MELBA PHILLIPS [1]

LA MECANICA DEL "QUANTUM"

El universo contiene energía en una u otra de dos formas llamadas comúnmente materia y radiación. Ambas son atomísticas o "cuantificadas", no continuas. La mecánica del *quantum* es una descripción de este hecho, un método de tener en cuenta la atomicidad o discreción de la naturaleza. La física anterior al *quantum,* o clásica, basta siempre que está justificada la hipótesis de que la materia es continua, es decir, cuando la atomicidad carece de importancia porque intervienen en la cuestión muchísimos átomos y *quanta.* Por lo que se refiere a los átomos, moléculas, cristales, electrones libres y a la radiación, la mecánica del *quantum* ofrece una descripción completa y adecuada, dentro de los límites que tendremos que examinar al final de nuestro estudio. Dentro de este mismo terreno, por el contrario, la física clásica suele dar respuestas erróneas y desorientadoras, respuestas que no corresponden a los resultados experimentales, lo que equivale a decir que deja de expresar la atomicidad que existe en el mundo.

En la interpretación de los principios y conceptos de la mecánica del *quantum* han abundado la confusión y la incomprensión. No se me olvidará en mucho tiempo la observación de un colega de cierto departamento de una universidad que no mencionaré: "Estoy encantado con la física moderna. Al fin, los físicos reconocen que tampoco ellos saben nada con seguridad." Este es un caso extremo de falsa interpretación de la palabra técnica "incertidumbre", pero en modo

[1] Melba Phillips es profesora auxiliar de física en el Brooklyn College. Después de que se graduó en la Universidad de California, ha seguido dedicándose a la investigación y ha enseñado en varias instituciones, entre ellas el Bryn Mawr College, el Instituto de Estudios Avanzados y la Universidad de Minnesota. Es autora de numerosos trabajos técnicos relacionados principalmente con la teoría de los espectros atómicos y con la teoría de los núcleos de luz. *(N. del editor.)*

alguno se trata de un caso aislado. Incluso dentro del campo de la física costó trabajo durante largo tiempo comprender y aceptar plenamente las ideas radicalmente nuevas de la mecánica del *quantum*.

Siempre cuesta trabajo aceptar las ideas nuevas; pero los principios y las conclusiones que llegan a formar parte del cuerpo de cualquier ciencia son las consecuencias ineludibles de la investigación experimental. Lo mismo ha ocurrido con los principios de la mecánica del *quantum*. Los físicos abrigan la esperanza de perfeccionar sus ideas el día de mañana, a medida que se descubran nuevos hechos; pero por lo que ya se ha conseguido se puede decir que la física de hoy es acertada. Ha sido demostrada con todas las pruebas que han podido idearse y ha dado origen a innumerables aplicaciones. En cuanto al futuro, se cuenta, para emplear las plabras de Franklin D. Roosevelt, con la "ciencia, la frontera sin fin". La multitud de problemas no resueltos conducirá seguramente, tarde o temprano, a ideas tan radicalmente nuevas como lo fué la hipótesis del *quantum*, pero la ciencia no perderá nada salvo la ignorancia.

Claro está que los hombres de ciencia cometen errores; pero los errores no resisten la prueba del tiempo y la repetición (con variaciones) de procedimientos experimentales. Incluso puede decirse que los hombres de ciencia, al igual que las demás personas, sacan enseñanzas de las equivocaciones. Sin embargo, la física clásica no constituyó ni constituye un error, sino un éxito, un triunfo. En cierto sentido, uno de sus triunfos fué que dió origen a la mecánica del *quantum*.

Las raíces de la mecánica del *quantum* penetran hasta lo más profundo de la historia de la física, especialmente de la porción que trata de la luz. En el campo de la luz, que había llegado a coincidir con el de la radiación electromagnética, fué en el que se hizo necesario introducir en 1900 la hipótesis del *quantum*. Ocurrió esto veinticinco años antes de que fuera desarrollada la teoría matemática, veinticinco años durante los cuales se fueron acumulando las pruebas que habían de hacer ineludible el famoso y no muy acertadamente llamado "principio de incertidumbre".

En la segunda mitad del siglo XVII surgió una controversia sobre la naturaleza de la luz. Había resultado evidente, por las observaciones astronómicas de Roemer y otros, que la luz viaja a una velocidad finita. Pero ¿qué es lo que viaja? La mecánica sugería dos posibilidades alternativas —las partículas y las ondas— puesto que la conducta de ambas era bien conocida. Una partícula es como una bola de billar, sólo que más pequeña, y todo el mundo ha visto ondas sobre la superficie de un líquido. A pesar del éxito que obtuvo Huygens al explicar los fenómenos ópticos observados en términos de un

postulado de ondas, la idea más aceptable en aquel entonces era que la luz consistía en diminutas partículas, cuyo grado de fineza determinaba el color de la luz. Sobre esta base explicaba Newton todos sus grandes descubrimientos en este terreno, y su enorme prestigio bastó para desalentar durante más de un siglo toda tentativa seria por poner en tela de juicio la hipótesis. Debe reconocerse que la evidencia de que se disponía podía ser descrita tan bien de una manera como de otra.

Pero la ciencia progresa incansablemente, siquiera sea siguiendo un ritmo desigual. A principios del siglo XIX se hicieron experimentos decisivos que estaban destinados a dar respuesta a la pregunta "¿Partícula u onda?" Los experimentos de Young y Fresnel demostraron de una vez por todas que la luz es de tipo ondular. La presentación de los efectos de interferencia, tales como los que ofrecen dos ondas en un estanque, casi puede tomarse como la definición de una onda. Hoy día se repiten los experimentos de interferencia en cada laboratorio de física elemental y en una multitud de aplicaciones; pero la cuestión que Young y Fresnel plantearon certeramente y a la que encontraron la respuesta correcta, resultó, cerca de un siglo después, que no era en modo alguno la cuestión acertada. Claro que no era posible que ellos lo supieran entonces.

El siglo XIX fué sumamente fructífero para la física. Las técnicas matemáticas de Lagrange, Hamilton y otros habían hecho más poderosa a la vez que más elegante la mecánica newtoniana. Brillantes descubrimientos en el campo de la electricidad y del magnetismo florecieron en la electrodinámica de Faraday y Maxwell, con la predicción de que la luz misma consistía en ondas electromagnéticas. La confirmación de esta predicción constituye uno de los más hermosos ejemplos del entrelazamiento de las funciones que desempeñan la teoría y el experimento científico. En lo relativo al calor, el desarrollo de la termodinámica y la mecánica estadística de Gibbs y Voltzmann no sólo fué debidamente argumentado sino que sirvió de base a la gigantesca industria química.

Salvo en lo relativo a unos cuantos problemas insolutos, la física pareció instalarse en la cima del mundo. Se explicaban casi todas las cosas, el final del camino estaba a la vista, y los enigmas del universo —al menos los de la física— habían recibido una respuesta casi completa. Verdad es que no todo el mundo opinaba lo mismo, pero esa actitud era casi inevitable en hombres como lord Rayleigh, de quien se ha dicho que resolvía todos los problemas de la física teórica que hubieran podido presentarse. Hasta el propio Michelson juzgaba improbable que pudiera haber en lo sucesivo grandes descubrimientos,

y a su juicio, la física estaba condenada en adelante a investigar los decimales quinto y sexto. En este cielo maravillosamente claro —un cielo ilimitado—, Kelvin percibió dos nubes. Una de ellas, el experimento Michelson-Morley, condujo directamente a la teoría especial de la relatividad. La otra fué la distribución de la energía en la radiación electromagnética en equilibrio en una cavidad, el famoso problema del "cuerpo negro".

La respuesta dada por la teoría electromagnética y la mecánica estadística a la cuestión de cómo la energía se distribuye con arreglo a la presencia (a una temperatura dada) era franca y nada ambigua, pero también completamente errónea, es decir, estaba en absoluto desacuerdo con el resultado de la medición experimental.

Esta paradoja fué resuelta por Planck de una manera que pudo tildarse de violenta y desmañada, salvo que la respuesta era no poco elegante. El problema que se planteó no fué "¿Cómo puede ser comprendido esto en términos de las propiedades de la materia y la radiación?", sino "¿Qué hipótesis es necesaria para producir una fórmula que pueda coincidir con el experimento?" Para contestar a esta pregunta tuvo que postular el *quantum*, es decir, tuvo que prescindir de algunos de los axiomas de la física y sacar la conclusión de que la energía de una onda electromagnética de frecuencia v no puede ser asignada arbitrariamente, sino que sólo tiene los valores discretos $E=nhv$. Aquí, n es un entero, y el tamaño de la constante h es determinado para hacer que la fórmula se adapte cuantitativamente a la curva experimental de distribución. La consecuencia es que los osciladores mecánicos, que absorben y emiten la radiación, tienen niveles de energía discretos correspondientes.

El valor de la contribución de Planck no es aminorado por su arbitrariedad inicial. En primer lugar, la condición para la validez de toda hipótesis consiste en que sea compatible con el experimento. En segundo lugar, Planck rompió el hielo, aunque tímidamente, para penetrar en todo un nuevo mundo situado más allá del alcance de la física del siglo XIX. Desde el punto de vista histórico, no tiene gran importancia que el propio Planck dejara de seguir por ese camino y perdiera mucho tiempo y esfuerzos tratando de encontrar una solución menos radical. Otras personas, principalmente Einstein, se percataron de la significación de esta idea revolucionaria, y entonces dió comienzo la edificación de una nueva teoría, a la que sirvió de piedra angular la hipótesis de Planck.

Einstein fué el que postuló la existencia de partículas de luz llamadas *quanta* o "fotones", cada una de las cuales estaba dotada de energía igual a hv. En términos del *quantum*, explicó la descon-

certante variación que sufren los calores específicos de los sólidos con la temperatura, así como el efecto fotoeléctrico. Todo esto no significaba, ni por lo más remoto, un retorno a la teoría corpuscular de la época de Newton. No se había destruído ni una sola migaja de las pruebas que demostraban la naturaleza de onda de la luz: subsistían la interferencia y los efectos de la difracción, así como otros muchos experimentos sobre la radiación, para demostrar que la luz consistía en ondas electromagnéticas. Lo único que sucedía era que la luz se conducía *también* como las partículas.

Lo que esto significa es que, para una frecuencia dada v, no se emite o absorbe, ni puede percibirse de ninguna manera, una cantidad de energía menor que hv. La única manera de obtener cantidades más pequeñas de energía radiante consiste en disponer de frecuencias más bajas, para las cuales es más pequeño el *quantum* (no en tamaño, sino en energía). La razón de que no se hubieran descubierto los *quanta* durante tanto tiempo salta a la vista si se tiene en cuenta el tamaño de h: 6.61×10^{-27} ergios segundos. Un *quantum* de la luz verde, pongamos por caso, tiene una energía de unos 3×10^{-12} ergios, o sea 3×10^{-19} watios segundos, y un *quantum* de radiación de una antena de radio corriente tiene aproximadamente una mil millonésima. Los sentidos no pueden distinguir tan pequeñas cantidades de energía, y para registrarlas es menester realizar experimentos cuidadosamente preparados.

La evidencia de los *quanta* de luz llegó a ser completamente irrefutable. La hipótesis no sólo recibió la confirmación un tanto indirecta de la obra de Einstein antes mencionada: los experimentos de Compton y Simon indicaron que la luz viaja a modo de corpúsculo, es decir, que los *quanta* están suficientemente localizados en el espacio para actuar como partículas en las colisiones con los electrones. Para describir una colisión de esas, es menester definir lo que se entiende por momento de un fotón; pero la teoría de la relatividad había proporcionado una guía para ello: si la energía es igual a hv, el momento p es dado por $p = hv \div c$, donde c es la velocidad de la luz.

Al llegar aquí, debe ser evidente que la respuesta a la pregunta "¿Es ondular o corpuscular la luz?", tiene que ser: "¡Ambas cosas!" En términos de nuestros conceptos de la mecánica del siglo XIX, la luz tiene un carácter dualista. Es posible definir, no sólo la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de la luz, todas las cuales caracterizan una onda, sino también la energía, el momento y hasta la posición de un fotón. Existen límites respecto al carácter definido con el que podemos adscribir a la luz estos atributos de una partícula, límites fácilmente aceptables porque son evidentes en términos de

la descripción de la onda. Por ejemplo, a nadie se le ocurriría decir: "La onda está localizada en este punto geométrico", y todo estudiante de física sabe que una onda perfectamente monocromática es infinita en extensión.

La aparente contradicción radica en nuestros conceptos "onda" y "partícula" modelados de acuerdo con los fenómenos mecánicos macroscópicos que pueden ser experimentados directamente por nuestros sentidos. Si para la comprensión de un experimento dado se necesita tener en cuenta la naturaleza corpuscular de la luz, además de sus aspectos de onda, nos encontramos en el dominio de lo que llamamos los fenómenos del *quantum,* para los cuales no existe ninguna analogía en la mecánica clásica. Por consiguiente, no se dispone de ningún modelo visual y tenemos que utilizar simultáneamente dos modelos aparentemente contradictorios.

Mientras tanto, la luz no podía ser considerada, y no lo fué, como desligada de su interacción con la materia. La descripción de la materia, según la mecánica del *quantum,* brotó del contexto que hemos venido exponiendo, con sus propias dificultades conceptuales. Hubo enmiendas, y la teoría completa logró una descripción unificada de la materia y la radiación que constituye uno de los éxitos más brillantes logrados por la ciencia hasta la fecha.

La primera aplicación directa de la idea del *quantum* a la materia fué hecha por Bohr en 1913, cuando aplicó los niveles de energía de los osciladores de Planck al modelo del átomo de Rutherford. Su éxito al explicar el principio empírico de combinación de Ritz y otras características de los espectros atómicos fué sumamente consolador. Hoy día, la teoría original de Bohr parece tosca y poco satisfactoria. Se basaba en cierto número de hipótesis *ad hoc* que estaban en contradicción directa con lo que podía esperarse sobre la base de la física clásica, pero no implicaba ninguna modificación en las ideas de las partículas que componen el átomo. Los electrones y los núcleos de Bohr eran partículas según el modelo de la bola de billar, salvo que se conducían de una manera peculiar por lo que se refiere a los estados posibles de energía, etc. Pero en relación con esto, Bohr introdujo un principio sumamente importante y fundamental, llamado el "principio de correspondencia". Este principio afirma que en el límite de grandes números *quantum* o de acciones grandes en comparación con *h,* el *quantum* de acción de Planck, las leyes de la mecánica del *quantum* son las mismas que las de la física clásica. Es decir, si se aplica la mecánica del *quantum* a problemas en los que tienen escasa importancia la atomicidad o la naturaleza quantificada

de la materia y la radiación, que obtienen los resultados clásicos. La mecánica newtoniana y la electrodinámica clásica parecen ser, por así decir, un caso especial, lo cual, en vista de la gran cantidad de pruebas favorables a los resultados clásicos, constituye un argumento en favor de la exactitud de la teoría del *quantum*. Una condición necesaria, aunque no suficiente, para la validez de toda nueva teoría, consiste en que no esté en contradicción con resultados anteriores y bien establecidos.

Formulada 10 años después que la teoría del átomo de Bohr, la hipótesis de De Broglie fué el complemento de la de Planck. Afirmaba que la materia misma es de tipo ondular. Análoga a la definición del momento de un fotón como $p = h\nu \div c$, o $p = h \div \lambda$, define, en cuanto a las partículas, una longitud de onda $\lambda = h \div p$, o $\lambda = h \div mv$. Esta hipótesis, por sí misma, no añadió nada a la teoría del átomo. Su única virtud consistió en el mérito supremo de la comprobación experimental: cuando se aplicaba la prueba de una onda a los electrones, preguntándose si presentaban interferencias, la respuesta que daba el experimento era afirmativa.

Lo que se necesitaba ahora era un modo matemático de describir los átomos y los fenómenos atómicos en consonancia con los niveles de energía de Bohr, la hipótesis de De Broglie y los múltiples resultados experimentales que se habían obtenido o podían obtenerse en este campo. En realidad, se desarrollaron dos esquemas de ese tipo: la formulación de Schrödinger, llamada "mecánica de la onda", hacía uso directo de la hipótesis de De Broglie. Un enfocamiento distinto del problema, pero completamente equivalente, debido a Heisenberg y otros, partió del principio de correspondencia de Bohr más el principio de quantificación. La "mecánica matriz" de Heisenberg es más formal, depende menos de toda visualización, pero se asemeja a la mecánica de onda en el sentido de que sólo exige correlación con el experimento en cuanto a los resultados y no en las etapas intermedias de un proceso físico. Ambos puntos de vista utilizaban la mecánica clásica, y, como hemos hecho notar, ambos métodos equivalían a lo mismo. Juntos constituyen lo que hoy se llama la mecánica del *quantum*.

Los detalles de estas teorías no nos interesan aquí, pero sí sus bases así como sus consecuencias. Debemos consignar que todavía son válidas las leyes de conservación de la energía y del momento, y que se mantiene en el sentido del principio de correspondencia. Los nuevos axiomas expresan las limitaciones de la mecánica y la electrodinámica del siglo XIX: constituyen, no tanto una renuncia a los viejos axiomas, como una enunciación de hasta qué extremos pueden ser llevados és-

tos. Indican también el camino a seguir fuera de las limitaciones de la física clásica.

El axioma fundamental de la mecánica del *quantum* es el principio de incertidumbre. Se expresa en términos de los conceptos de la descripción de la partícula, y especifica los límites dentro de los cuales puede aplicarse esa descripción. Si x es una coordenada del espacio, que describe la posición, hay una incertidumbre en la especificación de x que es llamada Δx. De análoga manera, el momento p, que es la velocidad de la masa en la dirección x, resulta indeterminado por una cantidad Δp. El principio no hace enunciaciones en cuanto a cada una de estas incertidumbres por separado, pero dice que su producto es no menor de h, la constante de Planck, dividida por el factor numérico 4π. Matemáticamente, suele enunciarse así:

$$\Delta p \, \Delta x \sim h$$

donde $\sim$ significa "es del orden de magnitud". La misma enunciación es válida para las incertidumbres relativas a las otras dos coordenadas del espacio y a sus momentos correspondientes. También es válida en cuanto a energía y tiempo:

$$\Delta E \, \Delta t \sim h$$

El principio de incertidumbre se aplica tanto a los *quanta* de luz como a las partículas materiales. Si es válido para unos tiene que ser válido para las otras, para la conservación de energía y para el momento. Este principio es la clave de toda la mecánica del *quantum*, si se comprende adecuadamente. A su comprensión ha contribuído indudablemente con más claridad que nadie Niels Bohr, y mucho de lo que aquí decimos se le debe a él.

La idea básica, en términos de los conceptos "onda" y "partícula" es la dualidad de la materia y la radiación. Ambas se conducen a veces o en parte como ondas y otras como partículas. Estas dos formas de energía no son, por supuesto, idénticas: aunque el concepto onda es útil y hasta necesario para describir la materia, las ondas en cuestión son completamente distintas de las ondas de luz. Las ondas de materia son complejas en el sentido matemático. Puede ayudar a comprenderlo una analogía. Minkowski y Einstein consideraron conveniente y esclarecedor tratar el tiempo como una cuarta dimensión en el complejo espacio-tiempo; pero eso no significa que hubiera de confundirse un reloj con una vara métrica, ni tampoco que por el hecho de que representemos geométricamente el tiempo a lo largo del eje

imaginario aquél no sea físicamente real. Y ello a pesar del hecho de que el tiempo y el espacio "se mezclan" entre sí en toda transformación hasta establecer un sistema relativamente móvil de coordenadas. Así también, aunque la materia y la radiación tienen las dobles características de onda y partícula, son esencialmente diferentes, convertibles una en otra de acuerdo con la ya famosa ecuación $E = mc^2$, pero perfectamente distinguibles.

Bohr (por ejemplo, en *Physical Review*, vol. XLVIII, 1935, pág. 696) indicó que nuestras dificultades para visualizar los fenómenos del *quantum* proceden de que nuestros conceptos clásicos son inadecuados. ¿Qué derecho tenemos a suponer que podemos alcanzar una plena comprensión de estas cosas en términos de bola de billar y ondas en un estanque? Debemos estar dispuestos a aceptar los hallazgos de experimentos cuidadosamente planeados y realizados como indicación de lo que en realidad ocurre, correspondan o no tales hallazgos a lo que cabría esperar de nuestros modelos visuales. La prueba de una teoría adecuada es el resultado de la debida identificación de las predicciones teóricas con esos hallazgos. Los conceptos de la teoría, su vocabulario, deben relacionarse, directa o indirectamente, con algo mensurable.

Ahora bien, todos los datos atómicos experimentales son un tanto indirectos. Lo que observamos en realidad con nuestros sentidos no es el fenómeno mismo, sino que está engranado con él mediante el mecanismo más ingenioso y sencillo que es posible idear. El resultado de una medición individual lo interpretamos como uno de los conceptos clásicos —posición, momento o frecuencia—; pero lo que *vemos* es algo desprendido de un proceso atómico que se completa al hacer nuestro propio registro. Inmediatamente, surge esta pregunta: ¿se debe ello a la naturaleza o a la impropiedad de nuestros instrumentos de medición? Una de las características de la mecánica del *quantum* consiste en que la teoría misma no ofrece ningún procedimiento para seguir las etapas intermedias o los detalles del proceso. ¿Se debe ello a una falla de la teoría? ¿O acaso no carece de sentido pedir una descripción más completa? Es posible hacer preguntas desprovistas de sentido. A nadie se le ocurriría tratar de encontrar el color intermedio C, pero los físicos de hace sesenta años se esforzaban con ahinco por descubrir si nos movemos con respecto al eje o lo arrastramos con nosotros. Costó trabajo aceptar la respuesta de que *ni* nos movemos libremente a través del éter *ni* lo arrastramos a nuestra zaga.

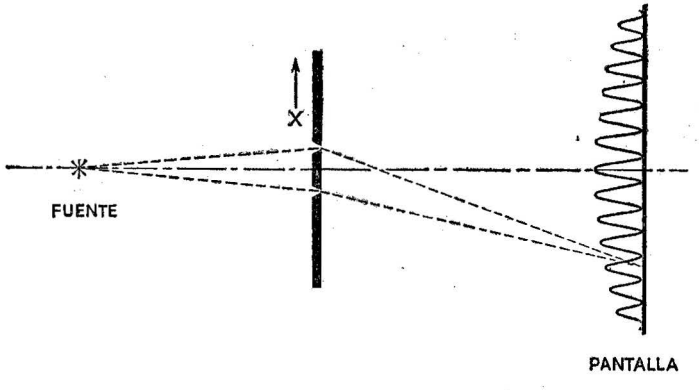
En el caso que nos ocupa carece de sentido pedir una descripción más completa, al menos por lo que se refiere a los procesos atómicos ordinarios. Las variables en cuyos términos se describe el

estado de una partícula corresponden a los conceptos de la mecánica newtoniana: coordenadas de espacio y tiempo, o de energías y momentos, tales como las que se usan en la segunda ley del movimiento de Newton. Naturalmente, estas son las cantidades que imaginamos en los experimentos a medir. El principio de incertidumbre significa que no podemos suponer alegremente que, en la física atómica, el sistema o el objeto, tiene valores definidos de todas estas variables. La incertidumbre no radica en nuestro conocimiento, sino en la cantidad que ha de medirse. En otras palabras, el principio de incertidumbre se aplica a la naturaleza, sea que la contemplemos o no. (La impropiedad de la palabra "incertidumbre" salta a la vista.) En la física clásica, era natural suponer que toda variable tiene un valor definido, aun cuando su valor sea desconocido, porque en principio podía medirse siempre. El significado de los aspectos dualistas onda y partícula consiste en que esto no es enteramente así, trátase de las partículas atómicas o de los fotones: sólo es verdad dentro de ciertos límites.

Estas limitaciones pueden expresarse plenamente en términos de los conceptos clásicos si se examina el proceso de la medición. Analizando dicho proceso fué como Bohr demostró que la mecánica del *quantum* es consecuente consigo misma y completa dentro de su radio de acción de aplicabilidad. En la física clásica puede hacerse una medición, en principio, sin afectar al objeto medido. En la física del *quantum* debe recordarse que el aparato de medición está formado por materia y radiación, las cuales están sujetas a las mismas relaciones de incertidumbre que el sistema al que se aplican las mediciones. La medición de toda variable perturba *necesariamente* el sistema, de modo que no puede suponerse que éste se encuentra en el mismo estado cuando se le aplica la medición que cuando no se le aplica.

Esto se demuestra con toda claridad examinando el experimento mediante el cual Young estableció originalmente la naturaleza de onda de la luz. Ahora sabemos que el mismo experimento puede realizarse substituyendo el rayo de luz por un haz de electrones. El aparato y los resultados aparecen indicados en la figura. Un haz de luz monocromático (o electrones) que procede de la fuente cae sobre un par de ranuras cuya longitud se extiende en línea perpendicular. La distribución de la intensidad sobre la pantalla, o la cantidad de oscurecimiento sobre una placa fotográfica, es indicada por la curva. En términos de ondas, el modelo proyectado sobre la pantalla se comprende fácilmente, y puede ser pronosticado por medio del principio de Huygens. Pero ¿cuál es la interpretación en términos de partículas?

A un físico de la escuela clásica tiene que resultarle evidente que cada fotón o electrón que llega a la pantalla pasa a través de la ranura superior o de la inferior. De ello se deduciría que podría hacer el experimento dos veces, con la misma placa fotográfica sirviendo de pantalla —una tapando la ranura inferior y otra cubriendo la superior— y obtener el mismo patrón de intensidad. Cada ensayo



constituiría una medición de *x*, la coordenada perpendicular a la longitud de las ranuras y paralela a la pantalla. Pero pura y simplemente no ocurre tal cosa. El oscurecimiento de la placa en los dos experimentos no presenta ninguna semejanza con el que se obtiene cuando están abiertas las dos ranuras. En otras palabras, el patrón de interferencia queda destruído completamente con una medición de posición que permita contestar a la pregunta: "¿A través de qué ranura llegó la partícula?"

Sin embargo, subsiste el carácter de partícula del electrón o del fotón. Si la fuente emite sólo un electrón o *quantum* de luz producirá una sola mancha sobre la pantalla. El diseño completo es producido por una sucesión de partículas. El conocimiento del diseño proporciona alguna información acerca del resultado correspondiente a una sola partícula en el sentido de que indica la probabilidad con la que un electrodo fotón tocará una porción dada de la pantalla. En este sentido, las leyes de física que se obtienen simplemente del diseño ondular sólo tienen validez estadística en términos de partículas.

Como un buen modelo de difracción sólo puede obtenerse con un haz de luz casi monocromática (o una corriente de electrones dotados aproximadamente de la misma velocidad) y como el modelo

puede calcularse partiendo de la longitud de onda, el experimento de Young es esencialmente una medición del momento, inclusive del componente del momento en la dirección x. Ha fracasado nuestra tentativa de medir simultáneamente la posición, cerrando primero una ranura y después la otra. Claro está que sabemos algo acerca de la posición —a saber, que la luz llegó de la parte de la pared donde se encuentran las ranuras—; pero por lo que se refiere a una exactitud comparable a las dimensiones del sistema de ranuras hemos fracasado. Se requiere un pequeño análisis matemático para demostrar que la incertidumbre es dada cuantitativamente por la relación

$$\Delta p \, \Delta x \sim h$$

Resulta así evidente, no sólo que el principio de incertidumbre corresponde a los hechos experimentales, sino que no es el resultado de aparatos inadecuados. Nuestro sistema de ranuras podría ser un mecanismo ideal, todo lo perfecto que se quiera, y se producirían los mismos resultados. La naturaleza es así. Hemos sufrido un revés al tratar de determinar simultáneamente tanto la posición como el momento de imponer nuestro modelo del siglo XIX —el modelo de la bola de billar— a una situación a la que es inaplicable. En otras palabras, los electrones y los *quanta* de luz sólo pueden compararse en parte, pero no del todo, con bolas de billar.

Bohr ha llamado "complementarios" a los pares de variables a los que puede aplicarse el principio de incertidumbre, como las coordenadas de posición y los componentes correspondientes de momento, o energía y tiempo. La palabra se origina en el hecho de que la combinación de *ambos* aspectos de los fenómenos físicos —pongamos por caso, la posición y el momento— caracteriza el método de la física clásica, de suerte que en este sentido se complementan el uno al otro. En los fenómenos del *quantum* podemos medir uno de esos dos aspectos con toda la exactitud que se nos antoje, pero a costa de renunciar al conocimiento preciso del otro. En esta "libertad de elección" —dice Bohr—, "tenemos que habérnoslas con una *discriminación entre diferentes procedimientos experimentales que procede del uso nada ambiguo de los conceptos complementarios clásicos*" (la bastardilla es de Bohr). Las limitaciones en cuanto al uso de los conceptos clásicos, impuestas por el carácter no clásico del electrón o del fotón, corresponden a la imposibilidad de efectuar la medición simultánea de dos variables complementarias.

En la mecánica del *quantum* se ha discutido mucho acerca de la causalidad. Las leyes físicas son descripciones de la conducta de sis-

temas físicos bajo condiciones dadas y son útiles porque nos permiten predecir la conducta futura partiendo del conocimiento presente. ¿Hemos renunciado a esto en algún sentido? Puede contestarse resueltamente que no. Cierto es que no podemos seguir la ruta de un electrón como podemos seguir la de una bola de billar; pero la razón estriba en que un electrón no es una bola de billar. La mecánica de la onda se ocupa precisamente de una función ondular, describiendo el estado del sistema, y de una ecuación de ondas que nos dice cómo esta función cambia en el tiempo. Es de la incumbencia de la mecánica del *quantum,* como del resto de la física, hacer predicciones. Estas predicciones son comprobadas por medio del experimento, y las importantes son precisamente aquellas que era imposible formular basándose en la física clásica. "En rigor —según Bohr—, sólo la exclusión mutua de dos procedimientos experimentales, al permitir la definición sin ambigüedades de las cantidades físicas complementarias, es lo que deja sitio para la formulación de nuevas leyes físicas, cuya coexistencia podría parecer a primera vista inconciliable con los principios básicos de la ciencia."

En nuestro estudio nos hemos ocupado hasta ahora de la mecánica del *quantum* no relativista fundada por Heisenberg y Schrödinger. Por lo que se refiere a los fenómenos comprendidos dentro de su radio de acción de validez, esta teoría se halla ahora tan fundamentada como la física clásica. Pero al igual que ocurre con cualquier otro avance de la ciencia, tiene sus propias limitaciones. La mecánica del *quantum,* tal como se presenta hoy, no constituye una respuesta definitiva, sino sólo un principio: deja sin resolver o sólo los resuelve en parte muchos problemas.

La mecánica relativista del *quantum* es la que no se encuentra enteramente en orden. Aun antes de la aparición de la mecánica del *quantum* era evidente que en toda teoría habría de tenerse en cuenta la relatividad, puesto que la mecánica newtoniana es una aproximación válida solamente para velocidades pequeñas en comparación con la velocidad de la luz. Los efectos relativistas pueden considerarse como correcciones en la mecánica de Schrödinger y Heisenberg. Dirac, Pauli y otros han realizado grandes progresos hacia una teoría consistente, en la que, por así decir, la relatividad forma un edificio y no un simple remiendo. La mecánica relativista de Dirac en cuanto al electrón ordinario (el negativo) condujo a muchas predicciones que fueron confirmadas por el experimento. Hasta hizo posible la comprensión del electrón positivo, o positrón, cuando éste fué descubierto en 1933. Ha esclarecido numerosos puntos de la teoría no relativista,

en particular el axioma especial que era necesario para el tratamiento de las partículas idénticas (el principio de exclusión de Pauli). Pero en cuanto a las energías muy altas y a las distancias muy pequeñas, tales como las involucradas en los núcleos atómicos, no existe aún una teoría adecuada. Resulta un tanto embarazoso, para decirlo suavemente, el hecho de que la teoría actual conduzca a menudo a respuestas matemáticamente infinitas en la comparación de efectos que en realidad son pequeños. La interacción de un electrón libre con la radiación, y la "autoenergía" del electrón, constituyen ejemplos de cantidades a las que la teoría da respuestas infinitas. A veces, es posible interpretar los resultados físicamente conservando sólo ciertos términos de una serie divergente o mediante la introducción *ad hoc* de un "radio aislante" para hacer converger las integrales infinitas; pero esos recursos son evidentemente poco satisfactorios.

No puede decirse con exactitud cuándo la física superará estas dificultades y repetirá en un plano superior el proceso destinado a hacer retroceder las fronteras del conocimiento. Se están acumulando pruebas que deben servir de base a una nueva teoría. Los estudios sobre los rayos cósmicos y los experimentos que serán posibles con las potentes máquinas ahora en construcción para acelerar partículas hasta altas energías deben arrojar luz sobre los derroteros posibles. Bohr ha sugerido ya que acaso sea erróneo esperar una teoría adecuada del electrón (tanto del positivo como del negativo). Hace veinte años se creía que toda la materia estaba formada por protones positivos y electrones negativos. La lista de "partículas elementales" comprende ahora, no sólo los electrones y los positrones, los protones y los neutrones, sino también por lo menos dos clases distintas de mesotrones (con masas intermedias entre las del electrón y del protón). Se tienen pruebas de la existencia de dos "neutrinos" diferentes, si ha de conservarse la energía y el momento. La mayoría de estas partículas son inestables y "degeneran" en otras partículas o radiación. Quizás el paso más importante que se dé a continuación en la teoría consistirá en un formalismo al que se ajusten todas estas partículas, o que, por lo menos, describa simultáneamente varias de ellas. Pero estas cosas no están claras todavía.

En cualquier momento dado de la historia de la ciencia, la teoría física es la descripción mejor y más consecuente que puede hacerse, en cuanto al lenguaje y a los símbolos matemáticos, de toda una serie de fenómenos físicos y de sus interrelaciones. Esa teoría no puede descansar sobre el pensamiento abstracto, sino que se construye en estrecho contacto con el experimento, lo que implica el intercambio de sugerencias entre el laboratorio y el análisis matemático. Cuando la

teoría y el experimento entran en pugna, y esta pugna persiste y es confirmada, debe revisarse la teoría. La forma en que debe procederse a la revisión depende, en los detalles, de los descubrimientos experimentales. Puede parecer desalentador el presente estado de cosas, cuando las infinidades se amontonan en la teoría sin contrapartida física y cuando los experimentalistas siguen descubriendo en 1947 nuevas partículas elementales; pero el mismo reconocimiento de la existencia de tantos problemas por resolver resulta alentador. Corremos poco peligro de repetir la cerrada perspectiva de Michelson, Ralleigh y otros grandes físicos de hace cincuenta años. La rapidez con la que la ciencia logra nuevas maravillas depende de los motivos, así como de los recursos técnicos y personales, y de la extensión en que es posible establecer la cooperación entre los hombres de ciencia de todo el mundo. Aunque hemos prescindido de ocuparnos de estas cosas, lo cierto es que hoy son motivo de mayor preocupación que las dificultades puramente técnicas que tenemos por delante.

J. B. S. HALDANE [1]

INTERACCION DE LA FISICA, LA QUIMICA Y LA BIOLOGIA

El hecho de abordar la biología desde un punto de vista materialista implica dar respuesta, entre otras, a las siguientes preguntas:

1. ¿Podemos explicar los fenómenos de la vida en términos de la física y la química actuales?
2. ¿Será ello posible en una fecha posterior?
3. ¿Será posible dar esa explicación en términos de la física y la química que se desarrollen más adelante?
4. ¿Es probable que se desarrollen seres vivos de seres no vivos, sin la intervención de otros seres vivos?

Mis respuestas son:

1. No.
2. Lo dudo, pero creo que no.
3. Sí.
4. Sí.

Hace cinco años hubiera contestado con una rotunda negativa a la pregunta 2, pero ahora no estoy tan seguro. Evidentemente, no se puede dar una respuesta categórica a la pregunta 4 hasta que se hayan logrado sintéticamente seres vivos o hasta que hayan fracasado las tentativas sistemáticas por lograrlos y hasta que sepamos mucho más acerca de cómo era la tierra hace mil millones de años.

[1] J. B. S. Haldane es profesor de biometría del University College de Londres y miembro de la Royal Society, así como doctor honorario de las universidades de París y Groninga. Tiene el título de caballero de la Legión de Honor. Es director del *Journal of Genetics* y entre sus principales obras figuran las siguientes: *Daedalus* (1923), *Enzymes* (1930), *Callinicus* (1924), *Possible Worlds* (1927), *The Inequality of Man* (1932), *The Causes of Evolution* (1933), *Science and Human Life* (1933), *Heredity and Politics* (1938), *The Marxist Philosophy and the Sciences* (1938), *Science and Everyday Life* (1939), *New Paths in Genetics* (1941), *A Banned Broadcast* (1946), *Science Advances* (1947) y *What Is Life?* (1947). *(N. del editor.)*

Las explicaciones que ahora se dan de la vida en términos materialistas son, por así decir, fragmentarias. Para dar una explicación completa se requiriría ofrecer un esquema de todos los átomos de un organismo simple, tal como un bacilo o una alga unicelular en determinado momento y en las partes relevantes de su medio ambiente, junto con aquellas de sus propiedades que fuera necesario señalar (v. g., los niveles de energía). Habría que seguir luego el sistema hasta tener dos bacterias o células comparables y demostrar que cada modificación operada en ellas era de la especie y del grado vaticinados sobre la base de la física y la química.

Por supuesto, semejante explicación se encuentra fuera de nuestro alcance si se trata de la más simple reacción química y probablemente se encontrará siempre. Lo único que podemos hacer es describir la conducta de los átomos típicos y aplicar los métodos estadísticos a conglomerados grandes. Este procedimiento da resultados sumamente satisfactorios en la química, porque en ella nos ocupamos de unas cuantas clases de moléculas y de gran número de cada clase.

El procedimiento tiene una aplicación limitada en la biología, porque la unidad funcional de la vida —tal como la célula— sólo contiene generalmente una o dos moléculas de ciertas especies, en particular, los genes, y porque el número de diferentes especies moleculares es excesivamente grande. Hasta ahora sólo hemos descrito especies moleculares cuyo número por célula se cuenta por millones o, al menos, por miles.

Así una sola bacteria —según McIlwain [1]— contiene alrededor de 100,000 moléculas de ácido nicotínico, 1,000 de ácido fólico y sólo una o un número reducidísimo del catalizador que transforma en ácido pantoténico el lactato, la β-alanina y las sales inorgánicas.

Salta a la vista que toda explicación materialista de la vida tiene que ser fundamentalmente una explicación en términos de cambios químicos. En su nivel más simple, la vida no es otra cosa que un patrón de reacciones químicas que se autoperpetúa. En el curso de estas reacciones, se construye alguna especie de forma. Sin embargo, no distinguimos por sus formas a las diferentes clases de bacterias. El movimiento de gran magnitud no constituye un elemento esencial de la vida. Puede existir alguna clase de sentimiento, pero no poseemos pruebas acerca de este punto. Tal explicación de la vida en un nivel bajo es, desde luego, muy incompleta; pero a nuestro modo de ver no hay hechos que sugieran que no podamos abordarla indefinidamente.

[1] Henry McIlwain: *Nature*, vol. CLVIII, pág. 898 (21 de diciembre de 1946).

Suponiendo que esa explicación sea posible, tenemos que preguntarnos después si la materia inorgánica podría haber producido un organismo simple y si éste podría haber evolucionado hasta convertirse en los diversos tipos de organismos vivos que hoy existen. El primer problema apenas ha sido examinado en serio, aun cuando no se le ha descuidado. En cuanto al segundo ha sido examinado seriamente por Darwin y sus sucesores.

Antes de volver a ocuparnos de ellos, examinemos la base físico-química de la vida. Teóricamente, podría parecer como lo más acertado ocuparse exclusivamente de las bacterias o de los protistas; pero no cabe duda de que éstos poseen una capacidad para la autorregulación y la curación de las lesiones, y tales procesos pueden observarse mejor en los organismos superiores.

La substancia viva está construída con la misma clase de átomos que se encuentran en el material no vivo. La mayor parte de su peso está formado por agua, y el resto, por una gran variedad de compuestos que incluyen proteínas, carbohidratos, grasas, ácidos nucleicos y varios elementos intermedios, tales como polisacáridos nitrogenosos y lipinas. Estos tienen esqueletos de átomos de carbono y suelen contener —además de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno— fósforo (siempre pentavalente) y azufre (generalmente bivalente). Otros elementos que se encuentran de vez en cuando en las grandes moléculas son el yodo, el magnesio, el zinc, el cobre, el hierro y probablemente el manganeso. Quizás pueda aparecer asociado el boro, y también, alguna que otra vez, el cadmio, el banadio y otros elementos raros. El sodio, el potasio, el magnesio, el calcio, el cloro y a veces el silicio existen en solución ionizada o en cristales iónicos; el cloro es incorporado a unas cuantas moléculas orgánicas mediante algunos procedimientos. Todos los elementos mencionados probablemente son esenciales para la vida, aunque no en todas las especies. Ninguna clase de átomo es peculiar a la vida, ni existen pruebas de que algo abandone el cuerpo al producirse la muerte: entonces llega a su fin cierta serie de fenómenos químicos, pero nada indica que se escapen del organismo espíritus vitales.

La vida se caracteriza por ciertas transformaciones de la materia y la energía. La energía es energía ordinaria, lo mismo que puede decirse de la materia. La energía procede de dos fuentes. Por un lado, la energía radiante se usa para sintetizar las moléculas orgánicas del agua o del sulfuro de hidrógeno, del bióxido de carbono, de los nitratos, de los sulfatos, etc., liberándose oxígeno o azufre. Por otro lado, la energía puede derivarse de la oxidación de moléculas orgánicas, o más raramente de moléculas inorgánicas, o el

reajuste de los átomos de moléculas orgánicas, como cuando la levadura produce alcohol, bióxido de carbono y un poco de energía libre, como consecuencia de la fermentación del azúcar. La energía liberada de este modo se presenta como calor, energía kinética y potencial, sonido, luz y energía eléctrica potencial. Nada sugiere que una forma particular de energía caracterice la vida. El equilibrio entre la energía que se obtiene de los alimentos y del oxígeno y la que se consume de diversas maneras es notablemente exacta. El hecho tiene particular importancia en el hombre, donde podría esperarse que la energía se convirtiera en formas metafísicas (v. g., voluntad o pensamiento) o procediera de fuentes metafísicas.

Los organismos parecen obedecer a la segunda ley de la termodinámica tan completamente como a la primera. Sin duda disminuyen su propia entropía al cabo de largos períodos, pero lo hacen extrayendo la entropía negativa del medio ambiente, por ejemplo, de la luz del sol y de los alimentos más el oxígeno. La entropía aumenta durante el proceso considerado en su conjunto, lo cual puede compararse a la acción de un martillo hidráulico al elevar a un alto nivel parte del agua de una cascada a costa de la energía del resto, o a la de una máquina de vapor al hacer funcionar una lámpara de arco o una temperatura superior a la de su horno.

Hace sesenta años los hombres de ciencia que admitían esto pensaban, no obstante, que sería imposible seguir la suerte de los átomos de los alimentos después de que entraban en la célula. La palabra "protoplasma" se empleaba, no sólo para encubrir nuestra ignorancia de los fenómenos intercelulares, sino para dar a entender que dichos fenómenos no eran susceptibles de ulteriores análisis. Desde entonces, se han aislado de las células numerosas enzimas, cada una de las cuales puede catalizar una etapa particular del metabolismo. Así, una enzima cataliza la pérdida de dos átomos de hidrógeno en un átomo de carbono del azúcar, y, por ende, la oxidación local de la molécula de azúcar; otra enzima, la fragmentación de una molécula de azúcar en dos moléculas de tricarbono, y así sucesivamente. Otra, construye moléculas de fosfato de glucosa para formar almidón y fosfatos. Todas las enzimas parecen ser proteínas, aunque muchas, quizás todas, tienen un grupo protético no proteínico, tal como un complejo metálico de porfirida, adherido a una masa mayor de proteína. Dada la existencia de unas mil especies de enzimas en una célula, parece muy probable que pueda explicarse la totalidad de su metabolismo. El aislamiento de todas las enzimas de un tipo determinado de célula no parece una meta imposible, aun cuando sólo se haya aislado hasta ahora una fracción en cada tipo particular.

La acción de la enzima no parece diferir esencialmente de cualquier otra acción química. No sólo podemos describirla, sino también predecirla. Así, Briggs y Haldane formularon las ecuaciones fundamentales de la kinética de un tipo simple de enzima, según las cuales, cuando se introduce una enzima en una solución de su substrato, se produce en determinada proporción el compuesto enzima-substrato. Más tarde, se descubrió que ciertas enzimas cambiaban de color al combinarse con sus substratos, y dieciocho años después, Briggs y Haldane, y Chance (1943) [1] demostraron que la peroxidasia sigue las leyes que ellos habían deducido. Las enzimas coloreadas tienen importancia por otra razón. Keilin ha seguido los cambios de color en las enzimas oxidativas dentro de una célula viva, y ha demostrado que esos cambios son precisamente los mismos que los que se producen cuando soluciones purificadas de las mismas enzimas actúan sobre sus substratos purificados. Esto permite descartar la idea de que las enzimas son solamente fragmentos muertos de gigantescas moléculas vivas de protoplasma, y de que su acción dentro de la célula se halla gobernada por leyes de naturaleza especial.

Existen enzimas que construyen moléculas complejas, pero dista mucho de saberse con claridad cómo las construyen dentro de los moldes altamente específicos que parecen caracterizar las proteínas. No sabemos si todas las moléculas, por ejemplo, de la insulina o la hemoglobina de un animal dado son precisamente iguales —prescindiendo de la substitución isotrópica y de los accidentes circunstanciales—, como lo son todas sus moléculas de glucosa. Pero indudablemente sus diseños deben ser muy similares. Las proteínas se construyen con unos 20 aminoácidos, y una proteína típica bastante liviana, tal como la hemoglobina, contiene alrededor de 600 residuos aminoácidos. La diversidad posible de moléculas de este tamaño se aproxima tanto al infinito como le es posible concebirlo al pensamiento humano. Según Eddington, en el universo sólo hay suficiente materia para elaborar alrededor de 10^{74} moléculas de esas. La cantidad de materia comprendida en todas las galaxias situadas dentro de quinientos millones de años-luz, y, por lo tanto, posiblemente fotografiables, es mucho menor. El número total de las proteínas posibles de seiscientos aminoácidos es de 20^{600}, o de 10^{781} y supera de hecho la décima potencia de la cifra anteriormente mencionada. Un conglomerado formado por una molécula de cada uno de los 60 residuos posibles de péptidos pesaría mucho más que el universo conocido. Este simple hecho demuestra que la diversidad de los organismos vivos

[1] Britton Chance: *Journal of Biological Chemistry*, vol. CLI, pág. 553 (diciembre de 1943).

puede tener una base química sumamente simple. Debemos suponer que, al menos en ciertos casos, las enzimas que elaboran las proteínas están provistas, no sólo de las materias primas —los aminoácidos—, sino también de la especificación correspondiente al modelo particular que ha de ser elaborado. Más adelante examinaremos la forma que puede adoptar esa especificación.

Es muy probable que dentro de un siglo los bioquímicos logren preparar todos los catalizadores de un tipo dado de célula, o todos los que se necesitan para las actividades rutinarias de ésta y que puedan determinar con suficiente exactitud cómo están ordenados dentro de ella dichos catalizadores. Quizás no hayan logrado sintetizar todos estos catalizadores, pero sí algunos, preparando otros con las células del tipo sometido a estudio. Entonces será posible, con esos catalizadores y otros materiales de naturaleza estructural, producir un modelo o una célula sintética que desarrolle durante considerable tiempo las actividades vitales ordinarias: por ejemplo, una célula de levadura que produzca alcohol, una célula de hoja que produzca azúcar al ser iluminada, o una fibra muscular que se contraiga repetidamente al ser estimulada y alimentada con azúcar y oxígeno.

Puede hacerse notar que la actina —la principal proteína contráctil del músculo— es una enzima que modifica su forma molecular en el curso de la transformación de su substrato, el ácido adenosinotrifosfórico.

Semejante célula sintética poseerá cuando menos cierto grado de autorregulación: también lo posee una máquina de vapor provista de regulador. Recobrará su forma original después de haberle sido impuestos algunos cambios: lo mismo ocurre con una pelota o, para tomar un ejemplo mejor, con la llama de una vela. Presumiblemente no será capaz de reproducción: tampoco lo es un caballo castrado. Faltará por definir si esa célula modelo será considerada como una célula viva.

Sin embargo, los organismos vivos poseen la capacidad de autorregulación en mucho mayor grado que cualquier máquina, y la de reproducción, que ninguna máquina posee. No obstante, la analogía de la llama de un mechero de gas o de una vela indica que los sistemas no vivos pueden poseer ambas en pequeño grado. La llama recobrará su forma original después de haber sido alterada por un soplo, aunque no extinguida, y prenderá un número indefinido de otras llamas similares si se la pone en contacto con el material apropiado. Ello se debe a que la llama, al igual que el organismo vivo, es un modelo de transformaciones químicas más bien que de moléculas. Los hombres primitivos tenían tanta razón al considerar las llamas como seres vivos

como Descartes al pensar que los animales eran máquinas, al menos del tipo que él conocía. Una serie de procesos físicos —por ejemplo, una fuente— recobrará a menudo su forma original después de haber sido alterada, pero rara vez se reproducirá. En cambio, un cristal es menos apto para recobrar su forma original y más apto para reproducirse. En particular, esta reproducción puede ser específica. Algunas substancias pueden existir en varias formas cristalinas. Si se introduce un cristal de una de ellas en una solución supersaturada o en una fusión superenfriada de la substancia en cuestión, ésta reproducirá más cristales de su propio tipo y no de cualquiera de los otros tipos posibles.

La célula es algo así como un término medio entre la máquina, provista de cierto número de componentes estables —tales como engranajes o válvulas electrónicas— y la llama, en la que cada parte es reemplazada rapidísimamente. Las grandes moléculas, tales como las enzimas, no son permanentes, como las piezas de una máquina, sino que de vez en cuando intercambian átomos con su ambiente, según se ha demostrado con el empleo de isotopos como indicadores. Sin embargo, un átomo dado de nitrógeno permanece en su lugar durante un período de tiempo que suele medirse en días y que rara vez es menor de unas seis horas. Una enzima puede transformar 100 moléculas de su substrato por segundo y a veces muchas más. Por consiguiente, la parte de la enzima que contiene este átomo puede ejecutar varios centenares de miles de operaciones antes de desaparecer. Y los átomos de carbono son bastante más estables que el nitrógeno.

Una célula sintética como la que hemos imaginado podría compararse con una máquina de vapor que convierte la energía química en calor y trabajo o con la unidad automática de una fábrica de productos químicos que realiza determinadas operaciones mientras es alimentada con los materiales apropiados. Tendría una facultad de autorregulación muy limitada y ninguna de reproducción. Esas son algunas de las razones que tienen la mayoría de los biólogos para no aceptar la teoría de Descartes de que los organismos son máquinas.

Pero antes de adoptar este criterio conviene precisar qué es lo que entendemos exactamente por la palabra "máquina". No definiré este vocablo, pero diré algo acerca de su historia. No está claro cuando una herramienta se convierte en máquina. A mi modo de ver una máquina debe tener varias piezas capaces de relativo movimiento. Seguramente que un cuchillo no es una máquina, un par de tijeras puede dudarse que lo sea y un molinillo lo es casi con certeza. Las primeras de todas las máquinas complicadas fueron los relojes. El reloj responde al propósito de imitar los movimientos del sistema so-

lar de modo que indique la dirección del sol y acaso también de la luna y los planetas. Ahora bien, el sistema solar se halla casi desprovisto de fricción. Sus movimientos son descritos por medio de ecuaciones que no se alteran apreciablemente cuando se cambia el signo del símbolo que en ellas representa el tiempo. Si en 1948 quiero yo calcular la posición de Júpiter en determinada fecha de 1958 puedo hacerlo. La misma serie de cálculos me da su posición en 1938 si supongo invertidos todos los movimientos del sistema. Además, los movimientos internos del sistema solar resultan tan poco afectados por las otras estrellas que probablemente habrán de transcurrir millones de años antes de que pueda medirse tal efecto.

Un reloj tiene propiedades similares. La mayor parte de su mecanismo funcionará hacia atrás. Sobre todo se halla aislado de su ambiente de dos maneras distintas. En primer lugar, ha sido diseñado de modo que funcione independientemente de los cambios que se operan en el ambiente, tales como la temperatura e incluso la presión barométrica. Si ha de llevarse sobre la superficie de la tierra, como cuando se trata del cronómetro de un barco, tiene que ser independiente de las variaciones operadas en el campo de gravitación de la tierra y no puede constar de péndulo. En segundo lugar, carece de medios para corregir su funcionamiento tomando como punto de referencia el medio ambiente. Confiamos en que su muelle, su péndulo o su cristal vibrante le permitirá marchar a la perfección. En caso contrario el hombre lo reajusta. Sería perfectamente posible diseñar un reloj cuyo funcionamiento pudiera comprobarse en cualquier noche despejada mediante una célula fotoeléctrica al pasar por el meridiano determinada estrella. (En la práctica, probablemente habría que utilizar dos o tres estrellas diferentes.) Sin embargo, todavía no existe un reloj semejante.

El reloj no tiene, pues, nada equivalente a órganos receptores que le permitan modificar su funcionamiento en respuesta a los cambios operados en el ambiente. Ello es así porque el sistema solar está aislado. Tampoco posee propioceptores que le permitan reajustar un funcionamiento inadecuado: ni el muelle ni el péndulo pueden considerarse como un propioceptor, pues una vez cometido un error, ya no puede corregirse.

Los organismos vivos superiores poseen exteroceptores y propioceptores. Los exteroceptores comprenden los órganos de los sentidos que nos permiten ajustarnos a nuestro ambiente, en particular, por medio del movimiento en los animales y por los diversos mecanismos que hacen que las hojas de una planta crezcan hacia la luz y sus raí-

ces hacia el agua. No se sabe con certeza si las bacterias poseen órganos de esta clase, aunque es indudable que muchos protistas los tienen.

Por añadidura, los animales superiores poseen propioceptores. Mi cerebro recibe mensajes de los músculos, los tendones y las coyunturas que permiten una regulación muy exacta del movimiento. Por ejemplo, cuando trato de coger mi mano izquierda con la mano derecha, puedo hacerlo incluso con los ojos cerrados. El síntoma más característico de que el sistema propioceptivo funciona mal consiste en el temblor: los músculos rebasan su objetivo sin alcanzarlo, luego retroceden y puede ocurrir que nunca se tranquilicen.

Ahora puede dotarse a las máquinas tanto de exteroceptores como de propioceptores. Ambos han sido desarrollados especialmente con fines bélicos cuando ha surgido la necesidad de los aviones sin piloto, de torpedos que se mueven hacia un sonido, de granadas que estallan en la proximidad de un avión enemigo que es descubierto por medio del radar, y así sucesivamente.

Finalmente, puede dotarse a las máquinas de algo parecido a la memoria. Esto se ve con toda claridad en el calculador Eniac, que tiene dos sistemas de registro. Por un lado, los resultados de cálculos anteriores son registrados sobre tarjetas perforadas, que pueden utilizarse automáticamente para motivar un cálculo subsecuente. Por otro lado, los resultados del cálculo corriente se conservan como un sistema de pulsaciones eléctricas que pasan a través de una artesa de mercurio y luego son repetidas mediante una serie de válvulas de modo que no pierdan su precisión. De este modo, pueden circular durante un espacio de tiempo considerable y son utilizables de nuevo en una etapa posterior. Por lo demás, la acción de semejante máquina es completamente irreversible: en ella, el tiempo tiene una dirección definida.

Es indudable que el organismo vivo se asemeja mucho más a un mecanismo de esta especie que a un reloj o una máquina de vapor. A mí me parece por lo menos posible identificar el organismo vivo con ese mecanismo, aunque más adelante examinaré algunos argumentos contra este punto de vista. Tal vez sea un error emplear la misma palabra "máquina" para designar sistemas dotados de exterocepción, propiocepción y memoria y para los artefactos que no poseen ninguna de esas propiedades, como el reloj medieval que ni siquiera tenía un péndulo que le sirviera de regulador.

Sea como fuere, no cabe duda de que el estudio de tales máquinas arrojará mucha luz sobre la biología y, en particular, sobre la acción del sistema nervioso. La mecánica corriente explica muchos

aspectos de la acción de los huesos al proceder como palancas, del corazón considerado como una bomba, etc. La termodinámica y la química explican muchísimo más sobre los fenómenos de la vida. En un trabajo muy interesante, al que debo mucho de lo que aquí digo, Wiener [1] ha sugerido que el estudio de las máquinas dotadas de las propiedades anteriormente mencionadas puede explicar muchas de las propiedades del sistema nervioso. Sorprende especialmente el hecho de que una neurona se asemeja a una válvula electrónica en el sentido de que se descarga completamente o no se descarga en absoluto, aunque en cualquiera de ambos casos el tiempo de la descarga puede determinarse mediante un complicadísimo sistema de estímulos. La patología de los servomecanismos, es decir, su tendencia a "cazar" bajo determinadas circunstancias, está arrojando ya luz sobre la patología del sistema nervioso, de la que hay un ejemplo en el temblor, y el cálculo Eniac puede resolver, no sólo problemas matemáticos, sino también problemas lógicos, y, por lo tanto, sugiere al menos lo que puede ser la base física del pensamiento.

Existen, empero, varias razones en contra de la suposición de que puede considerarse el organismo vivo como una "supermáquina" de esta especie, prescindiendo de las objeciones de tipo sentimental y de la rémora de la metafísica tradicional. La historia de la ciencia demuestra que una explicación materialista en un nivel dado puede ser de gran utilidad aunque inadecuada al fin y a la postre. La teoría mecanista cartesiana proporcionó los primeros rudimentos de una fisiología científica. La teoría de los átomos, como unidades indestructibles, fué de inmenso valor para el desarrollo de la química, pero también se desmoronó. Después de dos siglos de triunfo, la mecánica newtoniana tuvo que ser reajustada.

Asimismo, el estudio de la química celular sugiere la necesidad de proceder con cautela. En el siglo XIX obtuvimos una idea aproximada de las propiedades de los ácidos y las bases, que fué considerablemente esclarecida por la teoría iónica. Entonces resultó que los elementos integrantes de las proteínas —los aminoácidos— eran a la vez ácidos y bases, y que forman iones con cargas tanto positivas como negativas: por consiguiente, poseen propiedades completamente nuevas como las poseen las proteínas formadas por su unión. Otras propiedades únicas o por lo menos poco comunes de las proteínas dependen de la flexibilidad de las cadenas que las componen. En física y química es un lugar común que un sistema puede presentar propiedades nuevas como resultado de la unión de contrarios, de tal modo que quede

[1] Norbert Wiener: "El tiempo, la comunicación y el sistema nervioso", en *Annals of New York Academy of Sciences*, vol. L (1948).

abolido o disminuído el campo de fuerza externa de los componentes. Por ejemplo, la fuerza eléctrica entre dos protones equivale a 2.3×10^{39} veces la fuerza gravitacional. Sólo cuando los protones están asociados con un electrón cada uno puede percibirse la fuerza gravitacional. Aparte de las propiedades residuales que aparecen cuando quedan abolidos los componentes más sobresalientes del campo, existen otras propiedades nuevas que aparecen simplemente como resultado del tamaño de un sistema. Así, una molécula de hidrógeno tiene un sistema mucho más complicado de niveles de energía que dos átomos de hidrógeno. No parece imposible que una célula o un organismo considerado en su conjunto pueda tener propiedades no deducibles ahora de las de sus elementos integrantes, asociadas quizás con sistemas de niveles de energía como los de las moléculas, pero de una estructura más fina.

De ser así, todo sugiere que, si bien el estudio de los organismos vivos puede revelar nuevas propiedades de la materia, éstas serán explicables por las propiedades previamente desconocidas pero no incomprobables de sus integrantes elementales. Las propiedades ondulares de los electrones fueron descubiertas al estudiarse los espectros atómicos, es decir, los electrones en su calidad de integrantes atómicos. Se descubrió entonces que esas propiedades son válidas también para los electrones en haces, y el microscopio electrónico se convirtió en posibilidad. Es posible que la ciencia siga un curso diferente, y que los datos de la física atómica permitan la predicción de propiedades de conglomerados más grandes, algunas de las cuales pueden explicar fenómenos vitales.

En tercer lugar, se ha elaborado recientemente —en particular por Wright, Fisher y Haldane— una teoría matemática de la evolución completamente materialista, basada en las propiedades conocidas de los genes. Se da por admitida la propiedad fundamental de un gene: su capacidad de autorreproducción ordenada, aunque el ordenamiento no sea absoluto. Puede resultar (aunque a mí me parece sumamente improbable) que la propiedad de los genes sea eternamente inexplicable desde un punto de vista materialista; pero el hecho de que no se logre explicarla de esa manera no invalidaría la teoría anteriormente mencionada. Del mismo modo, puede ocurrir que las relaciones entre las neuronas sean tan similares formalmente a las de las válvulas del calculador Eniac que la teoría del Eniac sea también la de la corteza cerebral. Pero aun así es posible que llegue a descubrirse que las neuronas poseen propiedades no explicables en términos de la física y la química contemporáneas.

Hasta ahora hemos dado carpetazo al problema de la reproducción. Los hechos a explicar son los siguientes: una célula se divide en

dos hijas que no pueden distinguirse de ella. ¿Cómo se forman los diferentes componentes? Si aplicamos a la célula los rayos X podemos producir cambios en cualquiera de sus moléculas, y si estos cambios no són fatales ocurre una de estas dos cosas: o bien los descendientes de la célula original revierten completamente al tipo normal o bien se perpetúa una condición modificada. Cuando la reproducción sexual permite el análisis necesario, se descubre que la condición modificada es debida a un cambio operado en uno o más cromosomas. Puede tratarse de un cambio claramente localizado que describimos como la mutación de un solo gene, o puede tratarse de un reajuste que implica dos o más rupturas que son reparadas posteriormente para producir una inversión, una trasposición, una deficiencia o una duplicación. Es dudoso que pueda trazarse una línea divisoria tajante entre los dos tipos de cambio. Los cromosomas son reproducidos en su condición alterada, y el carácter engendrado por el cambio se hereda de acuerdo con las leyes de Mendel. Si un cambio similarmente reproducible acaeciera en el citoplasma, sería trasmitido principalmente por la línea materna. Aunque tales cambios se producen, son muy raros y casi siempre pueden explicarse por una modificación inducida en los simbióticos o virus. Así, las razas de *Paramecium aurelia* se dividen en dos grupos (Sonneborn, 1947).[1] El grupo A no presenta herencias citoplásmicas, mientras que el grupo B ofrece varios ejemplos, inclusive el agente citoplásmico al que se debe en parte su carácter "exterminador". Como varias especies de *Paramecium* son sin duda portadoras de algas simbióticas, y como los factores citoplásmicos sólo son transmitidos por una raza de *Paramecium aurelia,* parece que su presencia no constituye un carácter fundamental de la especie y que pueden considerarse, al menos provisionalmente, como agentes simbióticos.

Salvo raras excepciones, podemos, pues, decir, que en cada ciclo reproductivo celular, las moléculas del citoplasma no son copiadas de moléculas preexistentes, como lo son los cromosomas y quizás otras estructuras nucleares, tales como los centrosomas. Este proceso puede ser considerado como la reproducción de una estructura existente o como su imitación por el citoplasma, distinción que acaso sea solamente verbal, puesto que por ahora no puede sugerirse ningún experimento que permita distinguir entre las dos hipótesis. Los cromosomas consisten en nucleoproteína, lo mismo que los virus moleculares, que son copiados de análoga manera. Tal vez sea cuestión de gustos decir que una molécula de virus de tabaco, introducida en el citoplasma del tabaco, procede a reproducirse en este ambiente favorable, o afirmar

[1] T. M. Sonneborn. "Recientes progresos en la genética de los *Paramecium* y de los *Euplotas*", *Advances in Genetics,* vol. I, pág. 263 (1947).

que el citoplasma procede a hacer copias de las moléculas del virus introducidas dentro de él. La diferencia esencial entre un gene y un virus estriba en que la reproducción del gene se halla sincronizada con la de los otros componentes de la célula y en que forma parte de un cromosoma regularmente distribuído.

Desde el punto de vista fisicoquímico, el problema fundamental de la reproducción es, pues, el siguiente: ¿Cómo se reproducen el gene o el virus?

Existen por lo menos dos posibilidades. Podemos descartar la hipótesis del desarrollo de material cuantitativamente similar hasta que el conglomerado se vuelve inestable, como una gran gota de agua. Los resultados de la irradiación ponen de manifiesto que un gene no está formado por cierto número de partes idénticas, sino que debe considerarse como una sola molécula, aun cuando se le considere como una porción de una molécula todavía más gigantesca, el cromosoma. O bien es copiado un gene G, en cuyo caso G debe extenderse claramente como una hoja de no más espesor que un residuo de aminoácido, o bien el gene G es copiado en un "templado" g, y g copiado a su vez por dos nuevos genes G_1 y G_2. El último método es, por supuesto, el que se emplea en fotografía, donde el positivo se copia como negativo, del que se obtienen uno o más positivos. No es este el lugar adecuado para exponer en detalle los argumentos en favor de estas dos hipótesis. El primer proceso postulado se asemeja al crecimiento del cristal; el segundo tiene analogías con la formación de los anticuerpos. Aquí una proteína extraña induce la formación de anticuerpos, los cuales son también proteínas que pueden combinarse con aquélla, pero no con las proteínas estrechamente relacionadas. Esta no es una actividad específicamente vital, puesto que Pauling ha producido anticuerpos en el laboratorio. Resulta tentador especular acerca del hecho de que el gene puede existir en dos formas, G y g, una de las cuales consiste primordialmente en ácido nucleico, y la otra, en proteína, es decir, que el molde esencial puede expresarse en cualquiera de estas dos estancias. El hecho de que las cadenas de péptidos y ácidos nucleicos tengan espacios casi idénticos hace plausible la hipótesis. Por otra parte, las cadenas de ácido nucleico están formadas por sólo cuatro tipos de unidades, y las cadenas de proteína por unas veinte. Llama la atención, empero, que todas las proteínas autorreproductoras son núcleoproteínas. Además, se tiene la evidencia de que el ácido ribonucleico interviene en la síntesis de las proteínas citoplásmicas. Y sobre todo, tenemos el descubrimiento fundamental de Avery, McCarty y Macleod de que un ácido nucleico puede inducir a las bacterias a producir indefinidamente sus semejantes y también

a hacer un polisacárido característico. Aun cuando resultara que su ácido nucleico contenía una pequeña fracción de péptidos u otros residuos, es evidente que el molde específico puede expresarse en un patrón formado primordialmente por nucleótidos.

En resumen, podemos decir que el problema de la reproducción del gene puede ser soluble en términos de la química de las nucleoproteínas y de las enzimas que las construyen con materiales más simples. Puede resultar que en el proceso intervenga algún principio completamente nuevo, pero es indudable que el problema de la reproducción no se resolverá hasta que haya sido investigada concienzudamente la química de las núcleoproteínas.

Dada la existencia de genes que generalmente, aunque no siempre, se reproducen exactamente, el problema de la evolución parece soluble en principio. Es cuestión de observación el reconocimiento de que la sustitución de un gene por otro puede producir los más sorprendentes cambios en la fisiología y la anatomía, así como el hecho de que constantemente surgen nuevos genes por mutación, es decir, por imperfecciones en el proceso de imitación o por la iniciación de modelos alterados. Y es también cuestión de observación el hecho de que la selección puede ser causa de que se extienda a través de una población un nuevo tipo de gene. La principal dificultad a este respecto consiste en que en muchos casos se necesitarían varios cambios genéticos simultáneos para producir un nuevo sistema equilibrado. La obra de Sewall Wright sugiere, en particular, cómo puede haber ocurrido esto. Se ha dicho que todos los cambios en los genes son regresivos. Yo no comprendo cómo pueden considerarse igualmente regresivos el cambio que alarga el pelo de un conejo y el que lo acorta. Por otra parte, los rayos X modificarán el gene de un ojo de color normal convirtiéndolo en un gene de ojos blancos, transformándolo después en el gene del ojo normal. Ambos cambios no pueden ser regresivos ni considerarse como lesiones o inactivaciones del gene. Me doy perfecta cuenta de que algunas de estas afirmaciones pueden parecer dogmáticas, pero es difícil resumir en unas cuantas líneas la obra de toda nuestra vida sin dar la impresión de dogmatismo.

Paso ahora a ocuparme de la cuestión del origen de la vida. Si éste tuvo lugar sobre la tierra, debió acaecer muchísimo antes del período cambriano, que comenzó hace quinientos millones de años, pues en los tiempos cambrianos estaban bien desarrolladas las principales *phyla* invertebradas y de muchas de ellas existen fósiles precambrianos.

Es sumamente probable que el oxígeno de nuestra atmósfera se deba a la fotosíntesis, y el hecho de que antes de la época laurentina predominaran los compuestos ferrosos en las rocas sedimentarias, y

después, los compuestos férricos, sugiere que la fotosíntesis comenzó en este período. De ser así, la vida empezó sin que existiera el oxígeno. El hecho de que hasta en los organismos superiores muchos procesos esenciales son anaeróbicos (por ejemplo, no se necesita el oxígeno para la contracción muscular, aunque sí para el proceso de recuperación que hace posible las futuras contracciones) abona al menos este punto de vista.

La atmósfera primitiva de la tierra probablemente estaba formada de manera principal por hidrógeno y gases inertes, entre los cuales, por lo menos el hidrógeno y el helio se evaporaron pronto en el espacio a medida que la temperatura de la superficie fué muy alta. Cuando la superficie se enfrió, se formó una atmósfera secundaria con los gases combinados u ocluídos en el cuerpo sólido y líquido de la tierra. Esta atmósfera secundaria probablemente contenía amoníaco y metano como los de los planetas exteriores y bióxido de carbono, como el de Venus, además de vapor de agua y sulfuro de hidrógeno. La radiación ultravioleta no era absorbida, como ahora, por el ozono y el oxígeno a grandes altitudes. Debido a la acción de la radiación ultravioleta sobre los gases atmosféricos, se formaron varios compuestos orgánicos metastables que se disolvieron en los mares primitivos. Como no había bacterias que los destruyeran, debieron de alcanzar un alto grado de concentración. Disponíase así de alimento adecuado para los organismos anaeróbicos primitivos, y también de un considerable número de grandes moléculas orgánicas. Una vez en existencia la clase más simple de organismo, éste habría tenido relativamente pocas dificultades para propagarse, y variaciones accidentales pudieron darle la posibilidad de la evolución. Sin embargo, no debemos pasar por alto los enormes obstáculos que se presentan al tratar de dar una explicación plausible de su origen.

Desde luego, puede advertirse que algunas núcleoproteínas se reproducirán en un ambiente que contenga aminoácidos, azúcares, bases de purina y primidina y fosfatos. En tal caso, es fácil imaginar el origen accidental de semejante partícula y su autorreproducción indefinida. Pero es cuando menos discutible que un virus o un gene necesita para su imitación, no sólo materias primas, sino toda una batería de enzimas capaces de síntesis para sintetizar la núcleoproteína o uno de los dos componentes máximos, de acuerdo con un patrón preexistente. De ser así, los organismos originales debieron haber sido mucho más grandes que las moléculas. Parker-Rhodes (1946) pretende haber demostrado, sobre bases matemáticas, que todo organismo debe contener más de un *loculus,* es decir, la envoltura rodeada por una membrana semipermeable que contiene los catalizadores y sus subs-

tratos. Si su razonamiento es correcto, ello implica una considerable complejidad. En el océano primitivo surgieron indudablemente catalizadores de diversas clases; pero a no ser que estuvieran colocados de manera que formaran un sistema de autoconservación y autorreproducción, habrían destruído los alimentos disponibles.

Suponer que un sistema tan complejo surgió por casualidad puede parecer ridículo; pero debemos recordar que el espacio disponible para su formación era un océano que cubría una gran fracción de nuestro planeta y que el período de tiempo fué probablemente de más de mil millones de años (10^9), aunque menos de tres mil millones. Cuando conozcamos la suficiente bioquímica para poder especificar la magnitud y complejidad del sistema autorreproductor más pequeño posible y para formarnos una idea aproximada de la concentración de las moléculas orgánicas de diferentes tipos en el océano primitivo, estaremos en condiciones de decir si la probabilidad de semejante síntesis accidental estaba cerca de la unidad.

Objetar que en semejante contexto debe tenerse en cuenta la probabilidad equivale a dar muestras de una sorprendente ignorancia de los hechos relativos tanto a la física como a la moral. Yo pongo a hervir una marmita con absoluta confianza en el resultado, aunque sé que el proceso de calentamiento depende del movimiento accidental de un vasto número de moléculas. La probabilidad de que la llama no caliente la marmita es sumamente pequeña, pero calculable. Por otra parte, la teoría que la proporciona ha sido aplicada al caso de las fluctuaciones de los gases cerca de su punto crítico y se ha demostrado que sus resultados son exactos cuando puede comprobarse. Al conducir un automóvil, yo tomo ciertas precauciones. Si no lo hago esta noche es sumamente improbable que me sobrevenga algún daño, pero si las descuido durante varios años es casi seguro que heriré a un peatón. Si la probabilidad que tengo de matar a un peatón en el transcurso de toda mi vida fuera de una por un millón, sería necio que adoptara las precauciones que tomo. La moral se base en probabilidades de este género. Cuando siembro un campo existe quizás un 10 por ciento de probabilidades de que algunas semillas no germinen, pero una certidumbre práctica de que germinarán las suficientes para proporcionarme una cosecha. Es, cuando menos, posible que las condiciones que prevalecían sobre la tierra primitiva eran de tal naturaleza que ofrecían esta especie de certidumbre de que se originaría la vida. Si puede demostrarse, por un lado, que las condiciones no eran esas y, por otro, que la vida no pudo haber sido traída a la tierra por esporas procedentes de una fuente extraterrestre, habrá llegado el momento de evocar otras hipótesis.

Se ha insistido en que los organismos primitivos deben haber sido capaces de sintetizar todos sus componentes partiendo de un material inorgánico como las plantas verdes o, por lo menos, de compuestos orgánicos muy simples, y se sugiere que la mayoría de los organismos modernos ha perdido parte de esta capacidad sintética primitiva. Yo no estoy de acuerdo con esa suposición. Si los organismos primitivos surgieron en un medio de cultivo natural, habrían tenido que ser selectivos más bien que creadores. Sus procesos vitales habrían sido lentos, porque la gran mayoría de las moléculas orgánicas disponibles no se ajustaría a sus catalizadores. Por otra parte, cada paso hacia la autotrofia habría tenido considerables ventajas desde el punto de vista selectivo al permitir el uso de alimentos más simples. Pero si el océano primitivo contenía triosas a la vez que hexosas, ácido acético y ácido esteárico, etc., las etapas pudieron haber sido un tanto graduales.

La notable uniformidad de la base química de la vida y, sobre todo, el hecho de que todos los organismos vivos emplean la misma serie de azúcares y aminoácidos en sus procesos vitales y de que ninguno use sus antípodas ópticos, sugiere fuertemente que toda la vida sobre nuestro planeta se deriva de un solo origen. Unas cuantas bacterias producen apreciables cantidades de algunos de los aminoácidos "espejo" y los incorporan a los antibióticos, pero éstos no parecen formar parte de la substancia viva. Sin embargo, el hecho de que puedan hacerse de esta manera sugiere que los organismos "espejo" pudieron surgir y proceder del mismo modo en otras estrellas. Probablemente, sin embargo, algunos miles de años después del origen de la vida en nuestro planeta se usaba ya la mayoría de los materiales para un segundo origen, especialmente si los organismos primitivos tenían una oxidasa biaminoácida.

No obstante, la vida debió de desarrollarse de una manera muy lenta hasta que se logró alguna clase de fotosíntesis. Una vez que pudo disponerse de la energía radiante, desapareció la necesidad de materiales orgánicos, y una vez que fué liberado oxígeno en cantidades apreciables, la mayoría de los organismos primitivos debió ser exterminada, como son exterminados hoy los anaerobios, y el metano de la atmósfera secundaria y las soluciones orgánicas de los océanos primitivos debieron ser oxidadas, mientras que la cortina de ozono hacía más lenta la síntesis de las nuevas. Basándose tanto en razones morfológicas como en la presencia en ellos del metal o porfirinas no diferentes de la clorofila, es probable que los animales superiores, así como las plantas, sean descendientes de los primeros organismos fotosintéticos. Muchos de ellos, incluyendo todos los animales, han cesado ahora

de ser autotróficos y necesitan una variedad de azúcares, grasas, proteínas y vitaminas derivadas, en última instancia, de las plantas. Pero esta pérdida de función química acaeció probablemente después de la revolución producida por la fotosíntesis, cuando los organismos vivos llegaron a ser lo bastante comunes para que unos pudieran vivir devorando a los otros.

Desde luego, las anteriores ideas son moneda corriente. Tanto ellas como otras han sido desarrolladas con gran detalle por Oparin y otros. Sin embargo, para el caso de que se me acuse de plagio, puedo añadir que yo las hice públicas hacia 1927 en el *Anual del Racionalista* y que las reproduje en mi libro *La desigualdad del hombre*. El principal cambio operado en mis opiniones consiste en que ahora considero improbable que una molécula gigante, tal como un gene o un virus, hubiera podido reproducirse en el océano primitivo.

Supongo que se advertirá que la principal laguna existente en nuestra explicación materialista de la vida radica entre nuestra explicación de las enzimas, por un lado, y la de las células, por otro. Desde el punto de vista de la química corriente, las propiedades de las enzimas son notables, pero no inexplicables. Una enzima puede ser extraordinariamente selectiva, atacando sólo a uno de un par de esteorisómeros, o completamente incapaz de operar con una molécula de substrato que contenga un solo grupo extra de metilo. Puede ser sumamente activa, transformando hasta 100,000 moléculas de substrato por segundo, aunque tal producción probablemente nunca se logra en la vida. Y puede realizar notables proezas de síntesis, tales como la de obtener almidón del fosfato de glucosa. No obstante, sabemos bastante bien cómo funciona. Asimismo, dada una célula tal como un flagelato simple, podemos ver cómo pudo producirse la evolución y añadir los detalles, como hacen constantemente los paleontólogos y los geneticistas, sin modificar gran cosa las ideas fundamentales formuladas por Darwin y sus contemporáneos. Pero la laguna que existe en nuestro conocimiento entre la enzima y la célula es de considerable importancia. Yo no creo que haya por descubrir en esa laguna ningún misterio particular de la naturaleza de las cosas. La laguna existe por razones técnicas. No podemos observar con un microscopio estructuras mucho más pequeñas que una longitud de onda de luz. Y nuestros métodos químicos nos ofrecen un conocimiento un tanto fragmentario de las moléculas cuyo peso es de más de 10,000. En otras palabras, sabemos muy poco acerca de los objetos comprendidos entre 10^{-6} cm. y 10^{-4} (un aumento de un millón de veces a bulto). Gradualmente, los vamos conociendo con los rayos X, los microscopios electrónicos, las ultracentrífugas y otros métodos físicos y también por medio de métodos

biológicos, tales como el análisis genético. Si nuestros ojos pudieran ver con rayos X y no con la luz, tal vez surgiera una laguna en cualquier otra parte. Podríamos saber cómo funcionaba el protoplasma, pero no conoceríamos la organización celular de nuestros propios cuerpos: el misterio o la laguna de nuestro conocimiento se hallaría en un nivel diferente.

Claro está que no he dicho nada acerca de la conciencia, que está asociada al menos con algunas clases de vida, ni puedo decir en este breve ensayo nada más que unas cuantas palabras. Si, como sostienen algunos filósofos, las cosas en sí mismas no son en modo alguno como las percepciones que tenemos de la materia, la conciencia es un misterio inexplicable e irracional. Si, como creen la generalidad de los hombres, el mundo es como lo que sentimos, vemos y oímos, dedúcese que nuestras sensaciones, pensamientos, etc. son como las cosas del mundo externo. Quizás sean como la materia porque *son* materia, es decir, la materia de nuestro cerebro, o, más bien, algunas de sus propiedades, pues si muchas de las propiedades de la materia externa no dan origen a las sensaciones, se deduciría que las propiedades correspondientes de la materia de nuestros propios cuerpos no son sensaciones. Si nuestra conciencia es el autoconocimiento de la materia, la explicación físicoquímica de la materia puede ser substancialmente verdadera, pero no cabe duda que es muy incompleta. Esta es una de las razones por las cuales, aun siendo materialista, he titubeado al contestar afirmativamente a la pregunta número 2 formulada al comienzo de este trabajo.

Puede que haya lectores que piensen que las ideas aquí expuestas están totalmente divorciadas de la corriente principal del pensamiento humano y, en particular, que son incompatibles con toda moral elevada. No hay tal. No diré nada de las grandes filosofías asiáticas, excepto que tales opiniones tienen alguna afinidad con la filosofía Sankhya de los hindúes y muy poca con la filosofía Vedanta. Volviendo a Europa, tenemos que distinguir dos tendencias. Por un lado, los discípulos de Platón han trazado una separación tajante entre espíritu y materia. Los hombres comunes y corrientes rara vez han procedido así. Por regla general, creían que en el momento de la muerte, un espíritu abandonaba el cuerpo, pero creían que aquél tenía forma, tamaño y otras propiedades de la materia. La vida del cuerpo dependía de su unión con este espíritu. Si atribuímos al espectro visible pero no tangible una serie de cambios metabólicos, podemos adoptar algo parecido a la opinión del hombre común y corriente. Santo Tomás de Aquino sostenía que el alma humana era la forma substancial del cuerpo humano, formulación que tiene mucho de encomiable; pero

su creencia de que podía separarse del cuerpo me parece falta de fuerza. Sin embargo, tanto a través del pensamiento cristiano como del no cristiano, persistió la opinión de que no existen una tajante línea divisoria entre cuerpo y alma, opinión que fué expresada siempre que pudo hacerse sin riesgo.

En particular Milton, en el libro V del *Paraíso Perdido,* pone en labios del arcángel Rafael estas palabras dirigidas a Adán antes de su caída:

> Así, desde la raíz
> brota liviano el verde tallo, y de él, las hojas
> más airosas y la brillante y consumada flor
> que exhala su aroma. Las flores y el fruto,
> sustento del hombre, sublimizados en gradual escala,
> ascienden a los espíritus vitales, lo mismo al animal
> que al intelectual, y a ambos dan vida y sentidos,
> fantasía y entendimiento, de donde el alma
> recibe la razón, que es su ser.

Rafael dice a Adán que todas las cosas creadas lo son de "una materia primera" y que "si no se aparta del bien" puede evolucionar hacia Dios,

> Y el cuerpo hasta el espíritu se eleva, en saltos
> proporcionados a cada especie.

Como es natural, la formulación de Milton debe enmendarse teniendo en cuenta el mayor conocimiento del mundo que se ha alcanzado en los últimos tres siglos. Sin embargo, la opinión de que el espíritu es un florecimiento de la materia no impidió a Milton tener elevados principios morales y (con yerros inevitables) vivir de acuerdo con ellos. Tampoco hay por qué pensar que quienes hoy día sustentan tal punto de vista se hallen privados de principios morales y no sean capaces de vivir o, si es necesario, morir por ellos.

C. JUDSON HERRICK [1]

ESTUDIO BIOLOGICO DE LOS NIVELES INTEGRATIVOS

La primera finalidad de la biología como rama de las ciencias naturales consiste en la exacta descripción de las cosas vivas y de lo que hacen. Pero esto no es más que el cimiento de una superestructura de clasificación, generalización y explicación de cómo hacen lo que hacen y por qué. El material del que están compuestos los cuerpos vivos y su organización carecen de sentido para la biología, excepto si se consideran en términos de actividad vital. La vida es un proceso, y la meta hacia la que se encaminan todos los estudios biológicos es la comprensión de este proceso, con el objeto de regularlo de una manera más eficaz.

La estructura material del cuerpo vivo es un mecanismo. Por consiguiente, el biólogo tiene que ser un materialista de alguna clase (independientemente de cualquier otra cosa que pueda ser también), porque, como indicó Herbert Spencer, el proceso vital es esencialmente la correspondencia del mecanismo vivo con los otros mecanismos naturales del mundo que le rodea. El cuerpo material debe ajustar su propia actividad a las de otras cosas materiales; pero puesto que la materia sólo se define y se describe ahora en términos de su acción, el materialismo del biólogo debe concebirse en términos dinámicos. Lo que le interesa en fin de cuentas no es solamente el cuerpo ni sola-

[1] Judson Herrick, profesor jubilado de Neurología de la Universidad de Chicago, reside ahora en Michigan. Durante la primera Guerra Mundial prestó servicios militares en el cuerpo de Sanidad, con el grado de mayor y tuvo a su cargo la sección de patología del Museo Médico del Ejército en Wáshington. Los trabajos que ha publicado comprenden alrededor de doscientos artículos científicos, principalmente sobre temas de neurología, y varios libros: *Introduction to Neurology* (1915, 5ª edición, 1931), *Neurological Foundations of Animal Behavior* (1924), *Brains of Rats and Men* (1926), *The Thinking Machine* (1929, 2ª edición, 1932), *The Brain of the Tiger Salamander* (1948). De gran importancia es el *Journal of Comparative Neurology,* del que ha sido director desde 1894. *(N. del editor.)*

mente su acción, sino las *relaciones* que existen entre los cuerpos (orgánicos e inorgánicos) y sus ajustes recíprocos. Ni la anatomía ni la fisiología tienen significación biológica si cualquiera de ellas prescinde de la otra. La antropología, la psicología y la sociología se hallan unidas por conexiones similares.

Por tanto, debemos investigar ante todo las propiedades de los mecanismos en general. Las máquinas hacen cosas, y lo que hacen es algo que se diferencia de las materias primas de las que han salido. Este proceso creador y la naturaleza del producto fabricado se hallan determinados por la organización intrínseca del mecanismo actuante. La afirmación puede aplicarse lo mismo a las máquinas naturales, como los sistemas fluviales y los cuerpos animales, que a las construídas por artificio del hombre. Puede ocurrir que un agente externo inicie el proceso; pero lo que el mecanismo hace efectivamente se halla determinado por su propia estructura, y ésta, en último análisis, es organización.

Corresponde a la ciencia averiguar cómo hacen sus productos las diferentes clases de mecanismos. Debe tenerse presente que una máquina —sea natural o artificial— no es una estructura inerte operada por fuerzas externas a ella: es un participante activo en el proceso y tiene una libertad de acción restringida, pues de lo contrario no podría hacer nada.

En su gran libro *Growth and Form*, D'Arcy Thompson escribió: "Desde el punto de vista físico, entendemos por "mecanismo" todo aquello que *frena, regula* o *guía por determinadas rutas* el funcionamiento de la energía." (La bastardilla es mía.) Este control, que es un proceso activo en el que se invierte energía, constituye la característica distintiva de todos los mecanismos e implica una acción *directiva*.

Estas propiedades de los mecanismos naturales saltan a la vista dondequiera, como lo demuestra el simple proceso de producir agua mediante la combinación química del hidrógeno y el oxígeno. El proceso es iniciado por un agente externo —por ejemplo, una chispa eléctrica— pero lo que ocurre después se halla determinado por las propiedades intrínsecas de los elementos integrantes. La fórmula enunciada por los primeros químicos —$2H + 0 = H_20$— resulta ya anticuada. Ahora, el signo de igualdad es reemplazado por una flecha, se incluye un factor de energía, y también un factor de tipo de organización. La fórmula revisada expresa, no un equilibrio, sino un proceso y este proceso es directivo, no accidental.

Cabe preguntar si, de ser conocidos todos los hechos, podría encontrarse semejante actividad accidental. En la naturaleza no existen fenómenos aislados, y la casualidad no tiene lugar en el orden natu-

ral. Un movimiento aparentemente accidental, lo es sólo dentro de algún cuadro particular de referencia. Hasta los movimientos de los electrones obedecen a una ley, pues de lo contrario no podrían ser sistematizados estadísticamente. Las leyes de la probabilidad implican el orden, no el caos. Los cálculos de Guye, de los que tanto uso hizo Lecomte du Noüy, han demostrado que la probabilidad de que una molécula de proteína fuera producida por la combinación casual de los átomos constituyentes es de 1 a 100 multiplicada por sí misma 160 veces. Este producto sería una masa de materia mucho más grande que la de todo el universo conocido. A esta *reductio ad absurdum* puede añadirse otra complicación. El cálculo presupone que, después de combinarse para formar la molécula, los átomos subsisten intactos. Ello no es cierto, y por consiguiente se agrega al problema una serie virtualmente ilimitada de variables adicionales. La casualidad no explica nada. Lo que observamos es una acción directiva ordenada. En cuanto a la "causa final" de estas tendencias directivas, la ignoramos.

La ciencia empírica (a diferencia de las ciencias normativas o analíticas, como la lógica y la matemática) es un cuerpo integrado de conocimiento acerca de las cosas de las que tenemos experiencia y acerca de nosotros mismos como sujetos de la experiencia. Si en nuestra experiencia de las cosas y los fenómenos naturales existe una aparente ruptura de la continuidad del proceso o en las relaciones, sujetas a leyes, que unen a las cosas entre sí, ello constituye un reto a la ciencia. Como la ciencia se preocupa de las relaciones de las cosas, un mundo caótico o desmembrado no podría ser investigado científicamente. Por consiguiente, una filosofía dualista o pluralista de la naturaleza equivaldría para el naturalista a una confesión de derrota.

Cuando se conocen adecuadamente las leyes con arreglo a las cuales tienen lugar los fenómenos naturales, podemos descubrir las causas. En una situación causal existe siempre una directiva. Nos interesa la causalidad porque el conocimiento de las causas puede permitirnos controlar la dirección tomada por los fenómenos naturales, o, si esto es imposible, regular nuestra propia conducta para ajustarla a ellos. A tal fin responden las máquinas hechas por el hombre y las organizaciones sociales humanas. El interés del naturalista por la causalidad es estrictamente funcional. No existe ningún agente causal que actúe sobre un proceso natural como un *deus ex machina*. La agencia activa radica en el proceso mismo: en realidad, *es* el proceso. Se hace un uso inexacto de las palabras cuando se dice que toda causa controla su efecto, pues el control se ejerce dentro del fenómeno, no sobre él. Esta "causalidad inmanente", como la llama Sellars, no es

otra cosa que la actividad directiva, la cual es inherente a todo mecanismo y constituye la característica distintiva del mecanismo como tal.

Por lo tanto, si consideramos el cuerpo vivo como un mecanismo, debemos reconocerlo por lo que es como *mecanismo*: una agencia causal creadora capaz de elaborar con materiales inorgánicos una substancia viva dotada de propiedades completamente distintas de las de los ingredientes que lo constituyen. La cualidad directiva de las actividades vitales —evolución orgánica, desarrollo individual, regeneración, conducta adaptativa, acción encaminada a un propósito, etc.— es única, no porque sea directiva, sino por el alcance y la complejidad de sus manifestaciones y por la capacidad de que da muestras para la autorregulación y la autodeterminación de nuevos patrones de ejecución.

Con rara clarividencia, Claude Bernard escribió en 1878: *La vie c'est la création.* Todavía hay mucho de misterioso en torno a esta facultad creadora y al mecanismo empleado, pero nada se consigue apelando a agencias místicas situadas más allá del dominio del orden natural. La capacidad humana para inventar nuevas cosas y concepciones originales es el producto de esas facultades creadoras inherentes a toda la substancia viva, y las etapas sucesivas en la adquisición de esta capacidad están abiertas a la investigación. A su vez, esta creatividad vital tiene sus raíces en esa cualidad directiva que se advierte en toda situación causal, orgánica e inorgánica. La elaboración de novedades parece ser la principal industria de la naturaleza.

El objetivo confesado de la mayor parte de la investigación fisiológica ha sido *reducir* los procesos vitales a las categorías físico químicas del mundo inorgánico. El propósito ha logrado notable éxito hasta cierto punto; pero pronto se llega a un límite, pasado el cual no puede explicar los hechos observados, porque en la práctica estos procesos siguen la otra dirección: hacia adelante, no hacia atrás. Los innumerables procesos físicos y químicos de tipo inorgánico que se han reconocido en los procesos vitales aparecen combinados en patrones nuevos y distintivos, y esta creación de nuevos patrones se ha realizado a ritmo acelerado en el curso de la evolución orgánica.

Los problemas clave de toda la investigación científica no son analíticos, sino sintéticos. Ello es así porque las nuevas propiedades que emergen en las actividades directivas son combinaciones únicas integradas por elementos que carecen de tales propiedades. Un estudio de la historia de la evolución creadora revela niveles sucesivos de integración más compleja y eficiente. Como ha hecho notar Novikoff en un examen de los niveles integrativos:

Cada nivel de organización posee propiedades únicas de estructura y conducta que, aunque dependientes de las propiedades de los elementos constituyentes, solamente se presentan cuando estos elementos se combinan en el nuevo sistema... Las leyes que describen las propiedades únicas de cada nivel son cualitativamente distintas, y su descubrimiento requiere métodos de investigación y análisis adecuados al nivel particular.[1]

Se recapitulan aquí los precedentes temas generales, algunos de los cuales son tratados con más extensión en otras secciones de esta obra, porque son esenciales para la comprensión de las relaciones que existen entre los fenómenos vitales y los del mundo dentro del cual se producen y del que forman parte. La integridad de este cosmos y el ordenamiento de todos los procesos naturales es la inducción básica de la ciencia moderna.

Al investigar las agencias integradoras que mantienen unido al mundo y conservan la unidad y la individualidad de sus partes constituyentes, es decir, al investigar las causas de la secuencia ordenada de los acontecimientos, vamos en busca de tendencias directivas en los fenómenos sometidos a observación. Esta es, como acaba de señalarse, la característica más evidente de los cuerpos vivos.

En el curso del desarrollo del individuo, desde el huevo hasta la madurez, existe un incremento sucesivo de la complejidad de la estructura y la conducta, con una ampliación de la variedad y alcance de las actividades directivas. Se tienen también muchas pruebas de que, en los centenares de millones de años durante los cuales ha existido la vida sobre nuestro planeta, modificaciones similares han dado por resultado una mayor eficiencia en el ajuste de los seres vivos al ambiente, incluso un mayor control del ambiente mismo. Este control puede modificar los rasgos físicos del terreno (arrecifes de coral, diques de castores, proyectos de irrigación), puede revolucionar la flora y la fauna de un contiente (substituyendo bosques y praderas con granjas), y en todos los niveles de organización vital existe algún grado de control social dentro del grupo y de un grupo a otro (con una instrumentación complicada, en la sociedad humana, en materia de administración política, etc.)

Los movimientos directivos suelen llamarse progresivos; pero se ha definido el progreso de tan diversas maneras, se le ha discutido tan a menudo sin definirlo y pasando subrepticiamente de una connotación a otra, que gran parte de esta dialéctica es inútil. Para el objeto que ahora nos proponemos, la evolución orgánica progresiva puede definirse como un cambio en la dirección del incremento del alcance, variedad y eficacia del ajuste del organismo a su ambiente.

[1] Alex B. Novikoff: *Science,* vol. 101 (1945), N° 2618, págs. 209-215.

Con un criterio similar puede calibrarse el progreso en el desarrollo de la carrera de todo individuo, es decir, por el éxito que ha tenido al hacer frente a las emergencias de la vida con energía, destreza y versatilidad, que producen un mayor grado de satisfacción. Si se conforma con satisfacciones mezquinas, su vida resulta empobrecida de manera correspondiente.

En el reino animal considerado en su conjunto, reconocemos cambios progresivos en dos direcciones hacia tipos de adaptación satisfactoria radicalmente diferentes. Los ajustes del primer tipo se hacen primordialmente en interés del animal individual, de su supervivencia y de la diversificación y ampliación progresiva del radio de acción de sus actividades, con necesidades más variadas, a la satisfacción de las cuales se presta especial atención. Tales ajustes implican también un incremento de la autosuficiencia y de la capacidad del individuo para adaptarse a una serie más amplia de condiciones externas. Este tipo de ajuste puede denominarse el tipo *individualmente modificable* o plástico. En el terreno de las organizaciones sociales humanas, lo llamamos democrático.

Los ajustes del segundo tipo pueden ser de una especie u otro grupo considerados como un todo para adaptarse a alguna peculiaridad del ambiente o a algún modo característico de vida. En este tipo *totalitario* de ajuste, el bienestar y la autonomía de los individuos se subordinan al grupo, como puede verse en la colmena y en el hormiguero. Tal tipo de ajuste puede ser o no progresivo según la definición que aquí hemos dado. En el caso de muchos parásitos, por ejemplo, es regresivo: una regresión eficaz desde el punto de vista de la supervivencia de la especie, pero a costa de la competencia individual y del radio de adaptabilidad de la especie.

Los tipos de adaptación individualmente modificable y totalitario no se excluyen mutuamente, pues todos los animales, desde el más bajo hasta el más alto, presentan alguna capacidad para el autoperfeccionamiento y, por lo menos, una especie rudimentaria de aptitud para aprender, y en todas las categorías de la vida se advierte algún grado de adaptación al grupo y de control social. Pero en las categorías superiores predomina claramente una u otra de estas tendencias directivas, de suerte que reconocemos dos tipos contrapuestos de diferenciación progresiva tanto por lo que se refiere a la organización como a la social.

Lo mismo en la organización del cuerpo individual que del grupo social intervienen siempre dos componentes. Uno de ellos es un sistema estable y relativamente rígido de características comunes a todos los miembros de la especie o del grupo. En el cuerpo, estas carac-

terísticas se ponen de manifiesto en los reflejos y los instintos, fijados en la organización genética de la especie; en la sociedad humana, encontramos algo similar en los códigos de conducta establecidos, que se transmiten de una generación a otra mediante lo que se ha denominado la herencia social, es decir, por el ejemplo, la tradición oral, los documentos escritos, las disposiciones legales, etc. En fuerte contraste con los patrones estereotipados de este sistema, existen otras características que se adquieren individualmente por la experiencia personal, incluyendo la enseñanza y todas las capacidades mentales superiores con ella relacionadas. Algunos patrones de conducta aprendidos pueden estabilizarse de tal manera como hábitos que resulta difícil diferenciarlos de los instintos; pero los hábitos no se heredan, y, al igual que todas las demás realizaciones culturales, deben ser readquiridos por cada generación sucesiva. Esto significa que el segundo componente de los patrones de conducta tiene una plasticidad de la que carece el primero.

En el cerebro humano, el aparato que ejecuta las dos clases de funciones es conspicuamente diferente. Los actos reflejos e instintivos se hallan controlados por una disposición relativamente rígida de células y fibras nerviosas que es sustancialmente la misma en todas las personas. Impregnando esta estructura estable, existe una retícula más flexible que llamamos neuripila, la cual, de una manera todavía desconocida, provee el condicionamiento de los reflejos y de otros rasgos modificables de la conducta. Además, el pedúnculo cerebral se halla envuelto por una capa gris, la corteza cerebral, que es el órgano específico de las funciones mentales superiores, con una estructura que varía muchísimo de una persona a otra. En todos los animales de sistemas nerviosos bien desarrollados pueden reconocerse estos dos tipos de estructura nerviosa, y en el hombre, el aparato del control inteligente de la conducta se encuentra tan ampliado que constituye más de la mitad de la masa total del cerebro.

En el curso de la evolución animal, una línea de especialización progresiva del tipo totalitario ha culminado en los insectos. Estos son organismos muy afortunados en la lucha por la existencia. Más de las dos quintas partes de los 2.500,000 de especies de animales conocidas son insectos. Existen más de 3,500 especies de hormigas, y Wheeler calculó que hay ahora más hormigas en el mundo que individuos de todos los demás animales terrestres. El grupo de las hormigas es plástico: las diversas especies se adaptan a toda situación posible. Dentro de la especie hay castas especializadas, con una refinada división del trabajo. Cada especie y cada casta presenta una sorprendente perfección de adaptación de estructura y conducta para la ejecución de

deberes específicos, rígidamente circunscritos. Estas adaptaciones de cada grupo se hallan determinadas biológicamente por factores estables —genéticos, de nutrición, etc.—, y la hormiga individual tiene una esfera muy limitada de capacidades. Disponen de alguna libertad de elección para lo que hacen y tienen alguna capacidad para aprender, pero ambas cosas son sumamente restringidas y la mayor parte de sus actividades se encuentran estandarizadas en interés de la colonia en su conjunto, no de sus miembros individuales. Cada hormiga debe sujetarse al patrón predeterminado de conducta refleja e instintiva estereotipada o perecer. Perecen en cantidades enormes, pero hay abundancia de hormigas y el cruel desperdicio es compensado por la gran fecundidad.

El hormiguero es un tipo totalitario de organización social en el que el bienestar del individuo se subordina implacablemente al del grupo. La integración del grupo es mantenida en virtud de su organización intrínseca, es decir, por el interjuego de las castas o clases constituyentes en un sistema equilibrado dinámico, sin ningún superamo que ejerza el dominio. El sistema es evidentemente muy eficaz para asegurar la supervivencia de los grupos y su adaptación a un amplio radio de condiciones; pero la eficiencia se encuentra a un bajo nivel de integración si se mide con un criterio biológico. Los insectos, como clase, ocupan una categoría inferior a la de los mamíferos, a pesar de su especialización más extrema. En el proceso evolutivo, aparecieron aproximadamente 150.000,000 de años antes que los primeros mamíferos, su especialización siguió una dirección diferente, y desde el período carbonífero hasta ahora se han extendido horizontalmente sobre este plano inferior. En contraste, la serie de animales mamíferos, que ha vivido mucho menos tiempo, ha progresado en una dirección diferente y a un ritmo constantemente acelerado hasta llegar al hombre, que pretende hallarse colocado en la cima del mundo.

Otro tipo de organización totalitaria puede verse en esos grupos dominados por un amo o dictador poderoso, como se observa entre las aves de corral, en los harenes de los criaderos de focas y en los gobiernos humanos de carácter monárquico y fascista. Aquí, la preeminente capacidad agresiva de un individuo o de una oligarquía logra imponer su dominio sobre una población compuesta, no de robots, sino de individuos dotados de plasticidad, iniciativa e inteligencia en mayor medida que la que poseen cualesquiera insectos. La agencia integrativa reside aquí en un jefe o poder central, y, en las sociedades humanas, si este poder es administrado con habilidad y firmeza, la eficiencia de la organización supera con mucho a la alcanzada por la organización igualitaria o comunal.

Pero no es esta la mejor manera de administrar los asuntos humanos, pues la historia de la cultura humana enseña inequívocamente que ninguna forma de organización totalitaria puede equipararse en eficiencia, como mecanismo de progreso cultural bajo las presentes condiciones, al tipo de ajuste que se caracterizó antes como individualmente modificable o democrático. Las múltiples tentativas que se han realizado para establecer comunidades sobre una base igualitaria han resultado utópicas. O bien la comunidad se desintegra a consecuencia de las fricciones internas, o bien sobrevive bajo el dominio de un dictador o de una oligarquía. Y ninguna monarquía absoluta ni ninguna dictadura es estable. Tarde o temprano, si no se transforma mediante el proceso democrático, es destruída por la rebelión. Tenemos amplia experiencia de las ventajas de la democracia, y ésta, como ahora veremos, tiene una sana justificación biológica.

Todos los cambios progresivos que se han mencionado implican la especialización del cuerpo individual o del grupo social, con diferenciación local de las partes, cada una de las cuales tiene alguna capacidad de acción autónoma independiente. Esta autonomía local, sin embargo, debe mantenerse siempre subordinada al control dominante del cuerpo considerado como un todo. De lo contrario, surgen conflictos que dan por resultado un menoscabo de la eficiencia, y, llevados al extremo, la muerte, como, por ejemplo, la que produce el cáncer. O bien, si el dominio central es de orden inferior y la autonomía local se desarrolla eminentemente, la integridad del individuo puede ser dividida determinando la escisión en dos o más personas separadas, como acaece en el crecimiento de los pólipos y en la segmentación de la tenia. En las organizaciones sociales humanas se observan procesos comparables en el nacionalismo desenfrenado (que es un desarrollo canceroso) y en las rivalidades de facciones que escinden una unidad social en organizaciones separadas.

En el desarrollo de todo cuerpo vivo y de todo grupo social se advierten estas dos tendencias que en algunos respectos son antogónicas: la diferenciación progresiva de las partes dotadas de autonomía local y, frente a esto, la necesidad de mantener la integridad del individuo. El éxito del vivir depende del desarrollo progresivo en ambas direcciones de modo adecuadamente equilibrado. La integración es el requisito primordial para la supervivencia. La individuación de las partes tiene lugar dentro del conjunto integrado y debe mantenerse subordinada a él. De ello se deduce que el descubrimiento de las agencias integradoras constituye un problema cardinal en biología. Es-

to es más evidente todavía en sociología, que es una disciplina fundamentalmente biológica.

Muchas de las agencias integradoras orgánicas que se han reconocido son similares a las que se ven en los mecanismos inorgánicos, tales como el ajuste para la distribución del esfuerzo mecánico, varios ingeniosos mecanismos para regular la circulación de los flúidos y los cambios de la temperatura, las propiedades físicas de las superficies y la permeabilidad de las membranas, reacciones químicas de variedad infinita y los cambios asociados con el potencial eléctrico.

Existen otros mecanismos integradores que no tienen contrapartidas inorgánicas. El aumento del tamaño y de la complejidad de los cuerpos animales plantea la necesidad de conductores adaptados para la rápida trasmisión de una parte a otra. La circulación de la sangre, con los mensajeros químicos que ésta contiene, satisface algunos de estos requisitos. El protoplasma ordinario es también un conductor de energías físicas, químicas y eléctricas, aunque la transmisión es lenta y difusa. Algunas hebras más finas de protoplasma son modificadas especialmente para asegurar una conducción rápida a través de largas distancias por medio de rutas aisladas. La transmisión por estas fibras nerviosas implica procesos físicos, químicos y eléctricos bien conocidos, los cuales aparecen combinados en patrones de acción que son desconocidos en el mundo inorgánico. En todos los animales, excepto en los más primitivos, el sistema nervioso es con mucho el más importante aparato de integración, y ésta es su función primaria.

Los sistemas nerviosos más simples que se conocen se encuentran en los pólipos de coral, en las medusas y sus aliados, donde las fibras nerviosas aparecen entretejidas en una red que se extiende casi uniformemente a través de todo el cuerpo. El cuerpo de la medusa está más perfectamente integrado que el de una esponja de igual tamaño, porque la esponja no tiene nervios. La red difusa mantiene cada parte del cuerpo de la medusa en comunicación con las demás. No existe cabeza ni ninguna otra estación central de control. La integración se efectúa simplemente por el interjuego de un sistema de conductores que facilita la acción coordinada de todas las partes en interés del bienestar de la totalidad del cuerpo.

En los animales superiores provistos de cuerpos más complicados, el sistema nervioso presenta un aumento progresivo de tamaño y una diferenciación en dos direcciones, que pueden denominarse analítica y sintética. Aparecen desarrollados varios órganos de los sentidos, cada uno de los cuales está dispuesto para responder a una clase específica de energía circundante: presión, ondas sonoras, ondas luminosas, etc. Estos órganos sensoriales y los nervios y ajustadores centra-

les conexos comprenden el aparato destinado al análisis de la experiencia sensorial. Del lado motor, se encuentra un análisis similar en los órganos de explosión. Entre el repertorio total de respuestas posibles al estímulo, sólo se seleccionan aquellas que determinan una conducta apropiada a la situación que registran los órganos sensoriales.

La red nerviosa difusa que se advierte en la medusa sería incapaz de realizar el refinado análisis de la experiencia sensorial y motora del tipo estímulo-respuesta que realizan los animales superiores. Se necesita un aparato central de ajuste para clasificar las diferentes clases de mensajes sensoriales recibidos y para dirigirlos por los conductos de salida adecuados. En consecuencia, y paralelamente con la elaboración del aparato analítico que acaba de mencionarse, el sistema nervioso central es ampliado y complicado progresivamente, para incluir también el aparato sintético que asegura la integración de todas las actividades locales y su acción coordinada.

El predominio central del aparato integrador adquiere una importancia progresivamente mayor a medida que pasamos de los animales inferiores a los superiores, a causa de la creciente complejidad de los problemas de conducta que deben resolverse. En las categorías inferiores, la mayor parte de la conducta aparece estereotipada en patrones estímulo-respuesta heredables, que reciben el nombre de reflejos o instintivos, existiendo relativamente poca posibilidad de modificar estos patrones por lo que pueda aprenderse a través de la experiencia personal. En los mamíferos superiores, no desaparecen los patrones estereotipados primitivos, pero son complementados por la capacidad progresivamente creciente de regular la conducta mediante la experiencia postnatal. Este incremento de la facultad de aprender va acompañado del ensanchamiento y de la complicación de la corteza cerebral, que es, de manera preeminente, el órgano de la instrucción y de todas las capacidades mentales que de ella dependen.

En la serie de los animales vertebrados, desde el pez hasta el hombre, el plan fundamental del cerebro es similar, pero las modificaciones del plan para adaptarse a los diversos modos de vida son sorprendentemente grandes y variadas. Sólo podemos citar aquí un ejemplo y éste se refiere al origen y a la significación de la corteza cerebral.

Los animales existentes más primitivos que poseen una corteza bien diferenciada son las tortugas, aunque en algunos peces y anfibios se ven rudimentos imperfectos de ella. El historial de los fósiles demuestra que de los reptiles primitivos ya desaparecidos partieron dos líneas divergentes de evolución progresiva, una que condujo hasta los actuales pájaros, y la otra hasta los mamíferos. En todos los pájaros existentes, la porción peduncular de los hemisferios cerebrales aparece

enormemente agrandada, pero la corteza que la cubre es reducida y apenas evidente en algunas especies. Por el contrario, en todos los mamíferos, la porción peduncular de los hemisferios aparece disminuída a menos tamaño que el de los reptiles, y la corteza está agrandada y diversificada de manera progresiva a medida que pasamos de los mamíferos inferiores a los superiores. ¿Por qué?

La respuesta es sencilla. Los cuerpos de los pájaros presentan un grado de especialización más alto que el de los mamíferos, y en el cerebro, la parte peduncular de los hemisferios y las estructuras conexas del tálamo están mucho más diferenciadas. Sabido es que estas estructuras cerebrales guardan relación principalmente con el control de los componentes instintivos y emotivos de la conducta, y estos componentes son más complicados en los pájaros que en cualquier otra clase de animales. Los pájaros, como los insectos, son animales que tienen mucho éxito en la lucha por la existencia. Señalan la culminación de una tendencia directiva en la evolución, recalcando, en un alto nivel de eficiencia, los patrones de conducta estereotipados y heredables. El número de especies es muy grande y se adaptan a una amplia serie de condiciones ambientales. Esta adaptación se efectúa por las especies en su conjunto, como ocurre con los insectos, aunque el método empleado es diferente del que se advierte en los insectos sociales. Los pájaros son más inteligentes que las hormigas, y sus vidas son mucho más ricas en experiencia diversificada. Sin embargo, el pájaro individual no es muy adaptable, y su capacidad para aprender es muy inferior a la de los mamíferos superiores. Los pájaros han dominado el aire, pero la inventiva del hombre les ha superado ahora en el control de su propio dominio.

La evolución de los mamíferos siguió una dirección diferente, recalcando la adaptabilidad y educabilidad de los individuos más bien que la diversificación de las especies de que forman parte. En los mamíferos más primitivos, estas capacidades no están sumamente desarrolladas, pero todos ellos poseen una capa cortical especializada de los hemisferios cerebrales, organizada según un plan que difiere de cuanto pueda encontrarse en el cerebro de otros animales y que entraña potencialidades virtualmente ilimitadas para posteriores desarrollos. En la evolución de los mamíferos, esta capa cortical se expandió a ritmo rapidísimo (medio de acuerdo con el tiempo evolutivo), y correlativamente con la diferenciación progresiva de este tejido, aumentó el tipo inteligente de ajuste.

En los antepasados reptiles de los mamíferos la mayor parte de la conducta era inflexiblemente refleja e instintiva, bajo el control del pedúnculo cerebral. En los reptiles existentes y en los pájaros, como

acaba de indicarse, la parte peduncular de los hemisferios cerebrales y el tálamo están enormemente desarrollados para ejecutar esas funciones. Pero en la corteza de los reptiles, vemos una etapa incipiente de desarrollo de una estructura de tipo diferente, que señala la aparición de un aparato integrador en un nivel superior: un nuevo patrón de organización que en los mamíferos asume el control de todas las actividades del pedúnculo cerebral subyacente. Este control es dirigido de manera inteligente y la inteligencia no es heredable: siempre se adquiere individualmente.

Las etapas sucesivas en estas transformaciones de la capacidad de conducta y de los órganos corporales con ella relacionados han sido estudiadas cuidadosamente. Existen unas cuantas lagunas en nuestro conocimiento actual de la continuidad de la serie de cambios a medida que pasamos de lo inorgánico, a través de las distintas especies del reino animal hasta llegar al género humano. Los dos puntos más críticos son los representados por la transición de lo inorgánico a lo orgánico y del bruto al hombre.

La laguna existente entre los dominios de lo inorgánico y lo orgánico es salvada de tantas maneras que no cabe invocar la intervención de agencias místicas inmateriales. Todos los materiales y energías que se encuentran en los cuerpos vivos se derivan del dominio inorgánico y a él retornan. Lo que hay de nuevo es el patrón de ejecución, y esto lo encontramos también en el dominio inorgánico, como cuando se hace agua con hidrógeno y oxígeno. En todos los casos se trata de una acción directiva.

El patrón no es una entidad no física, un huero verbalismo ni simplemente un concepto abstracto. Es una propiedad observable de todo cuanto existe, desde los átomos hasta las galaxias, desde la amiba hasta el hombre. Algunos de estos diferentes patrones son abiertamente discontinuos, de tal suerte que la evolución parece ser saltatoria; pero bajo la apariencia superficial de cada uno de estos saltos existe la continuidad del proceso. La laguna entre lo inorgánico y lo vivo, ha sido salvada por el descubrimiento de lo que Needham llama "mesoformas". Por ejemplo, tanto en la estructura intrínseca como en los patrones de conducta los virus conocidos ocupan una etapa intermedia entre las moléculas de proteína no vivas, por un lado, y el protoplasma vivo, por el otro.

En cuanto a la laguna entre el mono y el hombre puede considerarse ahora que ha sido salvada satisfactoriamente por lo que se refiere a la estructura corporal. Recientes descubrimientos paleontológicos han sacado a la luz tantas formas intermedias entre las especies

extintas de monos y los ejemplares fosilizados del hombre primitivo que ante nosotros aparecen los principales rasgos de los antepasados humanos.

En nuestro conocimiento de la evolución del hombre subsiste, sin embargo, un ancho hueco que no ha sido cubierto satisfactoriamente. El cerebro de las razas más primitivas de los hombres que viven ahora es aproximadamente el doble de grande que el de los monos que tienen un cuerpo de tamaño comparable. ¿Cuál es el significado de este cambio aparentemente saltatorio? La mayor parte del aumento se observa en la corteza cerebral y en sus dependencias inmediatas. Sabemos que esta corteza es el órgano específico de nuestra vida racional, y este conocimiento plantea la cuestión de la evolución de la mente y los problemas más fundamentales de las relaciones entre el proceso mental en general y las funciones fisiológicas obviamente relacionadas con el.

La conexión de nuestra vida mental con su instrumentación corporal a la que acaba de aludirse es tan íntima y de tal manera ha sido evidenciada por demostraciones científicas debidamente controladas, que debe aceptarse como un juego de relaciones orgánicas. Nuestros cuerpos se mueven y mueven sus miembros por medio de órganos bien conocidos, cuya acción se conoce con bastante exactitud, aunque todavía quedan muchos puntos oscuros. De análoga manera, nuestros cuerpos sienten y piensan, y los órganos mediante los cuales se realizan estos actos han sido reconocidos y descritos con gran detalle. La evidencia de que estas dos clases de actuación son ejecutadas por sus órganos respectivos es de naturaleza similar, perfectamente definida e igualmente convincente en ambos casos. Pero en cuanto al funcionamiento real del aparato que rige el proceso mental no sabemos tanto como acerca de la contracción muscular. Aunque todavía no sabemos cómo entendemos, puede que logremos averiguarlo.

La gran dificultad con que tropezamos en esta empresa radica en la disparidad entre nuestro conocimiento perceptual acerca de nuestros propios cuerpos y de todas las demás cosas objetivas, por un lado, y los procesos subjetivos mediante los cuales es manipulado este conocimiento en los actos de percepción y razonamiento, por otro. Las cosas y los acontecimientos de nuestro mundo objetivo corriente se hallan encuadrados en el espacio tridimensional y en la secuencia lineal del tiempo. Estos acontecimientos han sido sistematizados y explicados en términos de la mecánica newtoniana, de la geometría euclidiana y de la lógica aristotélica. Sin embargo, ahora sabemos que los principios que acaban de mencionarse no son universales. Son aplicables en lo

que sir James Jeans llamaba el "mundo de dimensiones humanas"; pero en los dominios de la física subatómica y del espacio astral han de ser complementados por los principios de la relatividad y de la mecánica del *quantum*. No por ello es menos cierto que todo lo que sabemos acerca de este mundo objetivo indica que es un sistema unitario integrado con sujeción a leyes.

También el dominio subjetivo se halla ordenado con sujeción a leyes, de acuerdo con principios que han sido codificados en las ciencias de la psicología introspectiva, la lógica, la lingüística y materias afines. Las leyes de este orden son radicalmente distintas de las del dominio objetivo. Por ejemplo, pueden hallarse enteramente emancipadas de las limitaciones de espacio y tiempo. Todo el pensar se efectúa aquí y ahora; pero este "especioso presente" puede abarcar, con la ayuda de símbolos, el espacio y el tiempo ilimitados. Los conceptos abstractos de principios universales, como "verdad", prescinden del espacio y del tiempo.

Esta aparente discontinuidad entre el dominio de la naturaleza objetiva tal como nosotros la conocemos a través de la evidencia perceptual, y el dominio de la experiencia subjetiva, tal como participamos en ella, no ha sido explicada satisfactoriamente. No se ha ideado ningún modelo de estructura-función, de acuerdo con los principios de la mecánica newtoniana o de la del *quantum*, que salve satisfactoriamente esta laguna, y un creciente número de autoridades competentes se inclinan a creer que tal construcción es imposible. Cuando se encontró que la mecánica newtoniana era inadecuada en los dominios de la física subatómica y astral, se descubrieron sistemas de relaciones completamente distintos. Esta analogía sugiere que acaso sea necesario descubrir un marco de referencia diferente, todavía desconocido, para que pueda esclarecerse el problema de las relaciones entre cuerpo y mente. La adquisición por el género humano de la capacidad para pensar en términos de símbolos de abstracciones —palabras, números, configuraciones conceptuales de diversas clases— señala aparentemente un paso hacia un nivel de integración superior al alcanzado por cualesquiera criaturas subhumanas. Sea como fuere, nos las arreglamos para experimentar el proceso de cerebración como participantes activos desde dentro de las obras, no como un espectador que contempla el aparato a través de conductos perceptuales.

Esta comprensión inmediata y excepcional no puede reducirse al nivel de los sistemas de la organización estructural y funcional de la que emerge. No nos dice nada directamente acerca del aparato orgánico involucrado, aunque, como hemos visto, es posible aprender muchísimo en cuanto a sus relaciones con los procesos subconscientes

subyacentes por medio de métodos objetivos de investigación. Toda la experiencia perceptual corriente se halla encuadrada en el espacio y el tiempo, pero la experiencia conceptual puede hacer caso omiso de esta limitación. Por eso los dominios subjetivo y objetivo de la experiencia parecen ser dispares e inconmensurables. La métrica empleada en la investigación física, química y fisiológica no es aplicable al dominio psíquico.

El alcance de nuestra experiencia conceptual y su habilidad inventiva han sido ampliados progresivamente. El espacio tridimensional y el tiempo unidimensional de la experiencia perceptual se han unido en un concepto de espacio-tiempo cuatridimensional, con una métrica diferente, y esto constituye ahora un instrumento útil de la investigación científica. Los matemáticos han ido más lejos en esta dirección y postulan dimensiones todavía más altas, para las cuales no encontramos analogías en la experiencia perceptual. Muy bien puede ocurrir que los dominios de la experiencia conceptual (introspectiva) y de la experiencia perceptual (extraspectiva) se hallen relacionados en términos de dimensiones no reconocidas aún y que todavía no han recibido expresión científica, aceptando la definición que Oliver L. Reiser da de la dimensión como "todo múltiplo que puede ordenarse". [1] Se apela aquí al principio de que si el orden integrado no puede observarse en cualquier nivel dimensional, acaso se encuentre en un nivel dimensional superior.

Este es el problema que nos desconcierta, y hasta que se resuelva este misterio debemos trabajar con las herramientas que tenemos, alertas siempre para la aparición de métodos mejores y de nuevas formulaciones de nuestros problemas, y circunscribiendo siempre nuestra investigación dentro del dominio de la experiencia comprobable, sin recurrir al misticismo.

La experiencia consciente no tiene existencia sino en el momento de su ejercicio. Como actividad corporal, está donde se hace, de la misma manera que la localización del campo magnético de una dínamo es determinada por el lugar donde se halla instalado el aparato que lo genera y se produce solamente cuando el aparato funciona debidamente. El mecanismo del acto consciente tiene localización en el espacio y el tiempo, pero el producto obtenido —el pensamiento— es moldeado según principios diferentes.

Cuál puede ser el mecanismo que interviene en el acto consciente y cómo difiere de los de sus precursores y acompañamientos insconscientes es cosa que todavía ignoramos. A este respecto, conviene re-

[1] Oliver L. Reiser: *The World Sensorium* (Nueva York, Avalon Press, 1946).

cordar que las funciones nerviosas más características del cerebro son reacciones circulares, y no reacciones en una sola dirección como se postula en la fórmula convencional estímulo-respuesta. Cuando las ondas sonoras llegan al oído se transmite un impulso nervioso al cerebro, y éste va seguido inmediatamente de un flúido nervioso que vuelve al órgano receptivo, a los músculos intrínsecos del oído medio y probablemente también al mismo órgano de Corti. Cuando se contrae el músculo, pasa un mensaje al sistema nervioso central que registra allí la localización y el carácter del movimiento. El tálamo y la corteza cerebral están recíprocamente conectados de tal manera que toda actividad de uno de ellos es registrada inmediatamente por el otro, por lo que ambos intervienen en toda actividad cortical.

Se tienen pruebas de que la conciencia emerge genéticamente dentro de la actividad corporal y es condicionada por ella. De esto se ha inferido que

> la conciencia de una sensación probablemente no se alcanza nunca hasta que ha habido una respuesta kinética a la misma, y no es improbable que sea la corriente refleja y no la directa la que entra en la conciencia. De esta manera es como puede explicarse la acumulación de vestigios en la corteza en aquellos casos en que el estímulo original nunca llegó a la conciencia.[1]

La corriente de la conciencia no es un fluir ininterrumpido; pero las actividades subconscientes de las que emerge la conciencia son continuas: no hay ruptura en el fluir del proceso vital. Esto abre un camino prometedor para el enfocamiento de nuestro problema.

Tales esperanzas se ven apoyadas por varias trayectorias de la investigación contemporánea que emplean instrumentos de reciente invención, nuevos métodos técnicos, originales conceptos de ingeniería y de los métodos matemáticos y, sobre todo, la convergencia en proyectos específicos de los conocimientos de especialistas de diversos campos. Para mencionar un solo ejemplo, en la construcción de las máquinas calculadoras electrónicas perfeccionadas se aplica el principio de ingeniería de la recuperación de tal manera que se obtienen resultados sorprendentemente similares a los obtenidos en las operaciones mentales de observación, memoria, análisis lógico y generalización. Los mecanismos empleados en la máquina y en el cerebro son radicalmente diferentes, pero los principios que intervienen en el proceso tienen mucho de común.[2] Parece ser que nos encontramos en el umbral de un nuevo dominio de la psicobiología.

[1] C. L. Herrick: *Journal of Comparative Neurology*, vol. 6 (1896), pág. XXI.

[2] Existe una literatura extensa que se ocupa de este tema y de otros conexos, a lo que pueden servir de ejemplo las siguientes obras y otras en ellas

Aunque todo acto consciente es solipsista en el sentido de que es estrictamente personal y privado, como lo es todo reflejo, ninguno de estos lapsos es un acontecimiento aislado. El acto mental tiene antecedentes y consecuencias, de los cuales algunos son experimentados conscientemente y otros no. En resumen, el acto consciente es un miembro integral de una situación causal, y estas relaciones causales son observables. El estudio de los juegos de relaciones constituye un método científico cardinal. De hecho, todo lo que conocemos acerca de cualquier cosa es su juego de relaciones, y toda explicación científica es una exposición de estas relaciones.

Un pensamiento es una posesión privada, y, como tal, no puede considerarse como un dato de la ciencia. No puede considerarse así directamente, pero si es expresado, la enunciación representa un acto abierto, y si es escrito como una proposición, se convierte en un objeto perdurable que puede ser examinado y reexaminado científicamente. Por medio de este y otros procedimientos indirectos es practicable una ciencia de la psicología introspectiva. Por otra parte, puesto que todo acto mental tiene antecedentes, acompañamientos y consecuencias que son objetivamente descubribles, estas relaciones fisiológicas, de conducta y de otra índole proporcionan los datos para las ciencias legítimas de la psicología fisiológica y comparada.

Estos estudios, que ahora se encuentran muy avanzados, han sacado a luz, en el dominio objetivo, tantos datos de la economía humana y animal, que podemos decir con certeza que la conciencia emerge dentro de la conducta como un nuevo patrón de actuación de modo parecido a como emerge la vida de lo no vivo, y que todo patrón nuevo surge por la acción directiva intrínseca a la estructura debidamente organizada. Las propiedades distintivas de nuestra llamada vida espiritual brotan dentro de nosotros de manera tan natural como nuestra respiración y nuestras contracciones musculares. Es tan natural que el cerebro piense como que el corazón lata.

Santayana define la naturaleza, según la conoce el género humano, como "la suma total de cosas potencialmente observables, algunas de las cuales son observadas efectivamente y otras interpoladas hipotéti-

citadas: Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener y Julián Bigelow: *Philosophical Sciences,* vol. 10 (1943), págs. 18-24; F. S. C. Northrop: *Science,* vol. 107 (1948), Nº 2782, págs. 411-417; L. K. Frank, G. E. Hutchinson, W. K. Livingston, W. S. McCulloch y N. Wiener: "Mecanismos Teleológicos", *Anales de la Academia de Ciencias de Nueva York,* vol. 50 (1948), art. 4, págs. 187-278; Herbert H. Jasper: *Science,* vol. 108 (1948), Nº 2805, págs. 343-347; N. Wiener: *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine* (Nueva York, Wiley, 1948), extractado por el autor en *Scientific American,* vol. 179 (1948), Nº 5, págs. 14-19.

camente". De esto se sigue que está justificado "considerar la naturaleza como la condición de la mente y no la mente como la condición de la naturaleza". [1] Cuando se examina la naturaleza, inclusive la naturaleza humana, con este criterio realista, nos impresiona inmediatamente la polarización del observador (el yo) colocado frente a las cosas observadas (el mundo objetivo). Esta polarización no es algo peculiarmente distintivo de la experiencia humana. Como hemos visto, toda cosa viva es una unidad integrada que se polariza de manera similar frente a las cosas que comprende su ambiente. Todo organismo es un yo en este sentido biológico. También observamos algo similar a través del mundo inorgánico. Una molécula de agua, como unidad integrada difiere de cualquier otra cosa con la que está en relación en virtud de sus propiedades intrínsecas.

Todo cuanto existe es único: de lo contrario, no podríamos definirlo como una cosa. Hasta los procesos repetitivos no siguen un patrón circular, sino espiral. Nada se repite nunca exactamente en la naturaleza. La experiencia humana señala la culminación (hasta lo que sabemos) de una serie cada vez más compleja de actividades directivas. Tiene propiedades únicas, al igual que todas las demás cosas de la naturaleza; pero estas propiedades se han desarrollado a través de evos de "evolución emergente" en un proceso continuo, cuyos principales perfiles aparecen ya claramente ante nosotros. La individualidad humana, la adquisición de manos y del aparato cerebral correspondiente para la invención y el uso de herramientas, la polarización del yo frente al no-yo, la cualidad directiva de la acción humana encaminada a un fin, la libertad humana para elegir un acto presente a la luz de la apreciación inteligente de posibles consecuencias futuras (mediante lo que Korzybski llama la "conexión temporal"), la adquisición del modo simbólico de pensar con ayuda del lenguaje, las matemáticas y otros instrumentos semánticos; la fabricación y codificación de reglas prácticas de conducta, de acuerdo con principios generales de utilidad y normas estéticas y morales, todos estos requisitos distintivamente humanos tienen sus raíces en varias actividades subhumanas que han sido identificadas y descritas de manera más o menos completa.

Las normas morales coronan propiamente esta lista de atributos humanos porque toda la historia de la cultura humana enseña que en nuestros actuales tipos de organización social tienen un efectivo valor de supervivencia. Sin la práctica inteligencia de una considerable subordinación de las ventajas personales, de grupo y nacionales al bien-

[1] George Santayana: *Reason in Common Sense*, 2ª edición (Nueva York, Scribner, 1928).

estar de otros grupos y de la población del mundo en su conjunto, la estructura social se desintegra y nosotros perecemos con ella. Y esta subordinación debe ser voluntaria, es decir, intrínseca al mecanismo en funciones, no impuesta por una potencia externa.

La sujeción a normas morales de decencia, honor y responsabilidad social es el precio que debe pagarse por la estabilidad social y progreso cultural. El hombre civilizado ha obtenido grandes victorias en la tarea de controlar, para su propio uso, su ambiente físico y los recursos de la vida vegetal y animal; pero ha fracasado lamentablemente en lo que se refiere a comprender su propia naturaleza y a aprender a vivir en paz consigo mismo y con sus vecinos. No ha comprendido la significación de las diferencias esenciales que existen entre su propia naturaleza humana y el resto de la naturaleza, y por ello, con excesiva frecuencia trata de hacer sus ajustes según las leyes de la selva. Miles de años de experiencia humana, y especialmente la experiencia de la presente generación, han demostrado sin lugar a dudas que las normas sociales del hormiguero y de la guarida del lobo no son adecuadas a nuestra situación: el código que puede servir para la mofeta o la hiena lleva al hombre a la perdición.

Es indudable, como lo han recalcado Sewal Wright y A. E. Emerson, [1] que las poblaciones son en gran medida las unidades del cambio evolutivo; pero las cualidades de los individuos que componen estas poblaciones desempeñan un papel progresivamente más importante en lo relativo a moldear el curso de los acontecimientos en las luchas que sostienen las poblaciones por la supervivencia. Por esta razón, en las categorías superiores de la vida, los tipos de ajuste individualmente modificables son más ventajosos que los tipos totalitarios, y por esta razón, las normas morales de los individuos constituyen factores decisivos para la supervivencia humana.

Afortunadamente, por debajo de la superficie del actual desorden, existe un substrato de naturaleza humana sana, vigorosa, emprendedora y decente. Yo tengo fe en la humanidad, porque sólo se necesita que nos mantengamos fieles a aquellas cualidades de nuestra naturaleza que han emergido de una ascendencia salvaje para asegurar los ajustes satisfactorios en un mundo sin cesar cambiante. Con el transcurso del tiempo (muchísimo tiempo, a juzgar por los actuales indicios) aprenderemos a vivir en paz con nosotros mismos a la vez que nos entenderemos satisfactoriamente con el resto del ambiente natural que nos circunda.

[1] A. E. Emerson: *Trans. Ill. Acad. Sci.*, vol. 39 (1946), págs. 9-18.

Ya poseemos los conocimientos y la especialización necesarios para dirigir nuestros asuntos a la luz de la razón, en lugar de dejarnos llevar por la codicia, la supremacía nacional, los prejuicios raciales y otros prejuicios tradicionales, los dogmas irracionales y los pensamientos arbitrarios. El cerebro humano y la vida de razón con la que nos dota son los productos naturales de un largo proceso de evolución emergente, y podemos acariciar la fe en que la naturaleza no será derrotada por su propia maquinaria. Mas para triunfar en el empeño debemos encontrar y aplicar algunos tipos nuevos de pensamiento.